

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Ivanec

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing.

Student:

Tomislav Ivanec

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru Doc.dr.sc. Željku Alaru na velikoj pomoći, uloženom trudu, savjetima i razumijevanju koje mi je pružio tijekom izrade rada.

Posebno želim zahvaliti svim članovima Zavoda za materijale te djelatnicima laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava na pruženoj pomoći, savjetima i vremenu koje smo zajednički utrošili u brojnim raspravama.

Na kraju želim zahvaliti prijateljima i svojoj obitelji na razumijevanju i bezrezervnoj potpori koju sam imao svih ovih godina. Hvala Vam svima.

Tomislav Ivanec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **TOMISLAV IVANEC** Mat. br.: 0035161182

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj kvalitete ispitnih uzoraka na nesigurnost mjernih rezultata statičkog vlačnog ispitivanja**
Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of the test samples quality to the uncertainty of measurement results of static tensile test**

Opis zadatka:

Statičkim vlačnim ispitivanjem se ispituje elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Ovim ispitivanjem utvrđuju se osnovna mehanička svojstva materijala. Kvaliteta izrade ispitnih uzoraka uvelike doprinosi mjernoj nesigurnosti rezultata mjerenja pojedinih mehaničkih svojstava.

U radu je potrebno slijedeće:


1. Opisati statičko vlačno ispitivanje.
2. Prikazati razlike između stare norme HRN EN ISO 10002-1 i nove norme HRN EN ISO 6892-1.
3. Odrediti utjecajne veličine na rezultate mjerenja mehaničkih svojstava materijala, a koje su vezane uz oblik i dimenzije ispitnih uzoraka.
4. Provesti eksperimentalna ispitivanja na različito pripremljenim ispitnim uzorcima u cilju procjene utjecaja pojedinih veličina na mjernu nesigurnost mjerenja mehaničkih svojstava materijala.
5. Analizirati rezultate provedenih ispitivanja i donošenje određenih zaključaka.

Zadatak zadan:
4. listopada 2012.


Rok predaje rada:
6. prosinca 2012.

Predvideni datum obrane:
12. – 14. prosinca 2012.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	X
1. UVOD.....	1
2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE	2
2.1. Načelo ispitivanja.....	2
2.2. Ispitni uređaji (kidalice)	3
2.3. Ispitni uzorci	4
2.4. Uređaji za mjerenje produljenja, ekstenzimetri	7
2.5. Svojstva dobivena statičkim vlačnim ispitivanjem.....	7
2.5.1. Youngov modul elastičnosti, E	10
2.5.2. Granice razvlačenja i vlačna čvrstoća.....	11
2.6. Brzine ispitivanja (razlike između stare norme HRN EN ISO 10002-1 i nove norme HRN EN ISO 6892-1).....	20
2.7. Određivanje mjerne nesigurnosti prema normi HRN EN ISO 6892-1 [4]	23
3. EKSPERIMENTALNI DIO	27
3.1. Ispitni uzorci	27
3.1.1. Mjerenje promjera d_0 i određivanje početne površine S_0	28
3.1.2. Mjerenje hrapavosti površine na mjernoj duljini uzorka	29
3.2. Statičko vlačno ispitivanje	33
3.3. Rezultati ispitivanja.....	35
3.3.1. Ispitivanje pri brzini pomaka od 2 mm/min.....	35
3.3.2. Ispitivanje pri brzini pomaka od 10 mm/min.....	37
4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	41
4.1. Analiza mjesta loma ispitnih uzoraka	41
4.2. Analiza vrijednosti početnog promjera tijela ispitnih uzoraka	43
4.3. Analiza rezultata statičkog vlačnog ispitivanja.....	45

4.3.1. Procjena i proračun mjerne nesigurnosti mjerenja.....	45
4.3.2. Analiza rezultata mjerenja čvrstoća	47
4.3.3. Analiza nesigurnosti istezanja i suženja	53
5. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema statičkog vlačnog pokusa [1]	2
Slika 2.	Univerzalni hidraulički ispitni uređaj [1]	3
Slika 3.	Obradeni ispitni uzorak za statičko vlačno ispitivanje [2]	4
Slika 4.	Ispitni uzorci okruglog i pravokutnog presjeka [7]	4
Slika 5.	Primjeri stezanja ispitnih uzoraka u stezne čeljusti [2]	6
Slika 6.	Dijagram sila – produljenje [7]	8
Slika 7.	Dijagram naprezanje – istezanje [4]	9
Slika 8.	Donja i gornja granica razvlačenja u različitim oblicima krivulja [4]	12
Slika 9.	Granica razvlačenja pri određenom trajnom istezanju,[4]	13
Slika 10.	Granica razvlačenja pri ukupnom istezanju [4]	14
Slika 11.	Različite krivulje naprezanje-istezanje i određivanje R_m [4]	16
Slika 12.	Metode određivanja A_e [4]	16
Slika 13.	Određivanje istezanja, A , A_t , A_g , A_{gt} [4]	19
Slika 14.	Skica poprečnog presjeka pravokutnog ispitnog uzorka nakon loma [2]	20
Slika 15.	Brzine istezanja u metodama A i B [4]	23
Slika 16.	Ispitni uzorci iz pojedinih skupina	27
Slika 17.	Skica mjernih mjesta na ispitnim uzorcima	28
Slika 18.	Skica mjernih mjesta za mjerenje hrapavosti	29
Slika 19.	Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na uzorku A9	31
Slika 20.	Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na uzorku B3	32
Slika 21.	Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na uzorku C12	33
Slika 22.	Slika ispitnog uređaja EU 40 mod	34
Slika 23.	Dijagram sila-produljenje za uzorak A1	39
Slika 24.	Dijagram sila-produljenje za uzorak B9	39
Slika 25.	Dijagram sila-produljenje za uzorak C5	40
Slika 26.	Ispitni uzorci iz skupine A nakon ispitivanja	41
Slika 27.	Ispitni uzorci iz skupine B nakon ispitivanja	42
Slika 28.	Ispitni uzorci iz skupine C nakon ispitivanja	42
Slika 29.	Dijagramski prikaz rezultata mjerenja d_0	44
Slika 30.	Dijagramski prikaz najveće i najmanje vrijednosti d_0	44
Slika 31.	Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 2 mm/min (skupina A)	47

Slika 32.	Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 10 mm/min (skupina A).....	47
Slika 33.	Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 2 mm/min (skupina B).....	48
Slika 34.	Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 10 mm/min (skupina B).....	48
Slika 35.	Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 2 mm/min (skupina C).....	49
Slika 36.	Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 10 mm/min (skupina C).....	49
Slika 37.	Dijagram prikazuje gornje granice razvlačenja R_{eH}	50
Slika 38.	Dijagramski prikaz rezultata donje granice razvlačenja R_{eL}	51
Slika 39.	Dijagramski prikaz rezultata vlačne čvrstoće R_m	51
Slika 40.	Doprinos nesigurnosti sile i početne površine na nesigurnost naprezanja	52
Slika 41.	Dijagramski prikaz mjerenja istezanja A	54
Slika 42.	Dijagramski prikaz rezultata mjerenja suženja Z	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Propisana brzina naprezanja [4]	21
Tablica 2. Rezultati mjerenja hrapavosti površine	30
Tablica 3. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine A pri 2mm/min.....	35
Tablica 4. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine B pri 2mm/min.....	36
Tablica 5. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine C pri 2mm/min.....	36
Tablica 6. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine A pri 10mm/min.....	37
Tablica 7. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine B pri 10mm/min.....	37
Tablica 8. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine C pri 10mm/min.....	38
Tablica 9. Rezultati mjerenja d_0	43
Tablica 10. Rezultati mjerenja čvrstoća skupine A	45
Tablica 11. Rezultati mjerenja čvrstoća skupine B	46
Tablica 12. Rezultati mjerenja čvrstoća skupine C	46
Tablica 13. Rezultati mjerenja istezanja skupine A	53
Tablica 14. Rezultati mjerenja istezanja skupine B	53
Tablica 15. Rezultati mjerenja istezanja skupine C	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost nakon loma
A_g	%	Trajno istezanje pri najvećoj vlačnoj sili, F_m
A_{gt}	%	Ukupno istezanje pri najvećoj vlačnoj sili, F_m
A_t	%	Ukupno istezanje pri lomu
a	-	Pola duljine intervala na kojem leži veličina
a_0	mm	Početna debljina plosnatog ispitnog uzorka
b_0	mm	Početna širina ispitne duljine plosnatog ispitnog uzorka
d_0	mm	Početni promjer ispitne duljine ispitnog uzorka kružnog presjeka ili promjer žice kružnog presjeka
c_i	-	koeficijent osjetljivosti povezan sa x_i
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
e	mm	Istezanje
\dot{e}	s ⁻¹	prirast istezanja
\dot{e}_{Le}	s ⁻¹	Prirast istezanja
f	-	stupnjevi slobode ($n - 1$)
F_{eH}	N	Sila pri gornjoj granici razvlačenja
F_{eL}	N	Sila pri gornjoj donjoj razvlačenja
F_m	N	Najveća sila
F_p	N	Sila pri kojoj dolazi do određenog trajnog istezanja
F_t	N	Sila pri kojoj dolazi do određenog ukupnog istezanja (elastično i plastično)
k	-	Koeficijent proporcionalnosti
L_o	mm	Početna mjerna duljina

L_e	mm	Mjerna duljina ekstenzimetra
L_u	mm	Mjerna duljina nakon loma
ΔL	mm	Produljenje
ΔL_m	mm	Produljenje pri najvećoj sili
ΔL_f	mm	Produljenje pri lomu
m_E	N/mm ²	Nagib krivulje naprezanje-istezanje u području elastične deformacije
n	-	broj promatranih rezultata mjerenja koja su provedena pod normalnim uvjetima
P	-	razina pouzdanosti
R_{eH}	MPa	Gornja granica razvlačenja
R_{eL}	MPa	Donja granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
\dot{R}	N/mm ² s	prirast naprezanja
s	-	standardna devijacija mjernih rezultata
S_0	mm ²	Početna površina poprečnog presjeka ispitne duljine
S_u	mm ²	Najmanja površina poprečnog presjeka nakon loma
t	-	faktor studentove t – razdiobe
t	s	vrijeme trajanja vlačnog ispitivanja
t_c	s	vrijeme upravljanja steznim čeljustima
t_{ec}	s	vrijeme upravljanja ekstenzimetrom ili vrijeme upravljanja steznim čeljustima
t_{el}	s	raspon vremena (elastično područje) za određivanje parametara
t_f	s	raspon vremena (obično do loma) za određivanje parametara
t_{pl}	s	raspon vremena (plastično područje) za određivanje parametara
$u(x_i)$	-	Standardna nesigurnost veličine x
u_A	-	Nesigurnost istezljivosti
u_{ao}	-	nesigurnost početne debljine ispitnog uzorka

u_{bo}		nesigurnost početne širine ispitnog uzorka
u_{do}	-	Nesigurnost presjeka tijela ispitnog uzorka
$u_c(y)$	-	Kombinirana nesigurnost veličine y
u_e	-	Nesigurnost produljenja u bilo kojem trenutku ispitivanja
u_F	-	esigurnost sile u bilo kojem trenutku ispitivanja
u_{Lo}	-	nesigurnost početne mjerne duljine ispitnog uzorka
u_{Le}	-	Nesigurnost mjerne duljine ekstenzimetra
u_{Lu}	-	nesigurnost konačne mjerne duljine uzorka
u_{So}	-	nesigurnost početne širine ispitnog uzorka
u_Z	-	Nesigurnost suženja
u_ε	-	Nesigurnost istezanja u bilo kojem trenutku ispitivanja
u_σ	-	Nesigurnost naprezanja u bilo kojem trenutku ispitivanja
$U(x)$	-	Proširena nesigurnost veličine x
Z	%	Suženje
σ	N/mm ²	Naprezanje

SAŽETAK

Statičkim vlačnim ispitivanjem se ispituje elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja i određuju se osnovna mehanička svojstva. Statičko vlačno ispitivanje je propisano normama za pojedine materijale. Norma HRN EN ISO 6892-1 opisuje metodu statičkog vlačnog ispitivanja metala pri sobnoj temperaturi. Iako norma propisuje mnoge stavke statičkog vlačnog ispitivanja, nesigurnost rezultata se ne može potpuno ukloniti. Na nesigurnost rezultata utječu mnogi parametri: od brzine ispitivanja, temperature ispitivanja, dimenzija ispitnih uzoraka, ispitne opreme, pa sve do kvalitete obrade ispitnih uzoraka. U teoretskom dijelu su opisani postupak statičkog vlačnog ispitivanja i načini procjene i proračuna mjernih nesigurnosti pojedinih mehaničkih veličina. U eksperimentalnom dijelu je provedeno ispitivanje na 30 ispitnih uzoraka od toplo valjanog čelika C 15 E 4, koji su imali različitu kvalitetu obrade. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici pri različitim brzinama istezanja, kako bi se odredio doprinos kvalitete obrade i brzine ispitivanja na mjernu nesigurnost rezultata statičkog vlačnog ispitivanja. nakon toga je provedena procjena i proračun mjerne nesigurnosti te analiza svih rezultata mjerenja. Na temelju toga doneseni su određeni zaključci.

1. UVOD

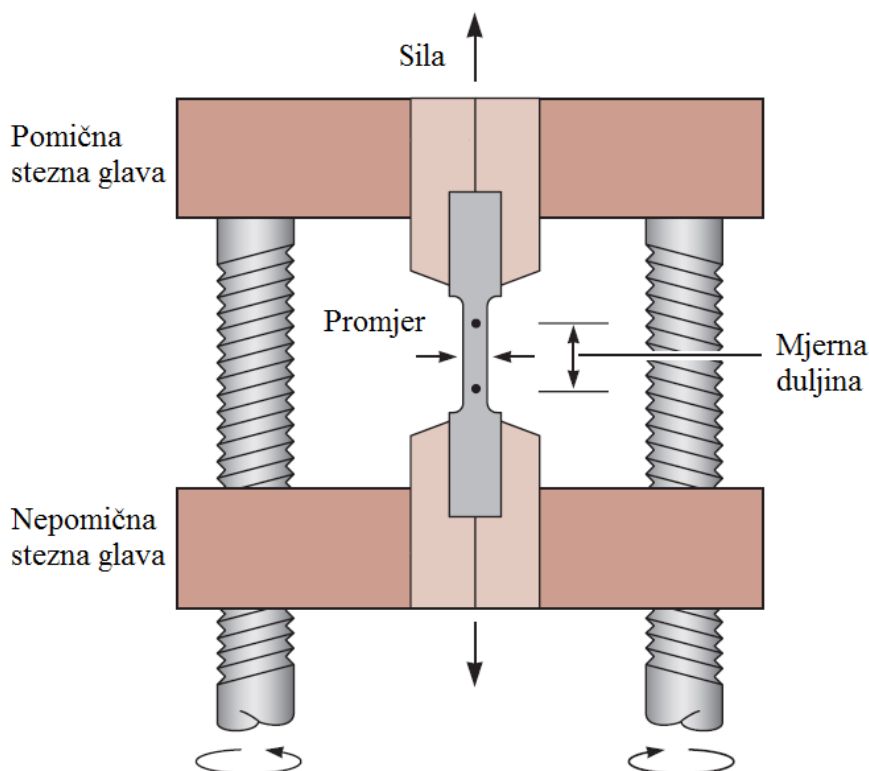
Svaki materijal se razlikuje prema svojim zasebnim svojstvima (toplinskim, mehaničkim, kemijskim, fizikalnim itd.). Kako bi se pojedini materijal mogao karakterizirati i primjeniti kod različitih proizvoda, da izvršava različite funkcije i zadovoljava različite zahtjeve, potrebno je poznavati ta svojstva. Određivanje svojstava materijala se provodi nizom različitih ispitivanja. Statičkim vlačnim ispitivanjem se ispituje elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja i određuju se osnovna mehanička svojstva. Pomoću ovih mehaničkih svojstava može se predvidjeti ponašanje materijala koji nije podvrgnut samo jednoosnom opterećenju, kao što je to slučaj kod statičkog vlačnog pokusa. Kako bi se rezultati mjerenja statičkog vlačnog ispitivanja, mjerenih u različitim mjernim laboratorijima mogli uspoređivati, postupak statičkog vlačnog ispitivanja određen je međunarodnim normama. Norma HRN EN ISO 6892-1 opisuje metodu statičkog vlačnog ispitivanja metalnih materijala i definira mehanička svojstva, koja se mogu odrediti statičkim vlačnim ispitivanjem pri sobnoj temperaturi.

Cilj ovog rada je odrediti utjecaj kvalitete ispitnih uzoraka na nesigurnost mjernih rezultata statičkog vlačnog ispitivanja i prikazati razlike između stare norme za statičko vlačno ispitivanje metalnih materijala na sobnoj temperaturi, HRN EN ISO 10002-1 i nove norme HRN EN ISO 6892-1.

2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE

2.1. Načelo ispitivanja

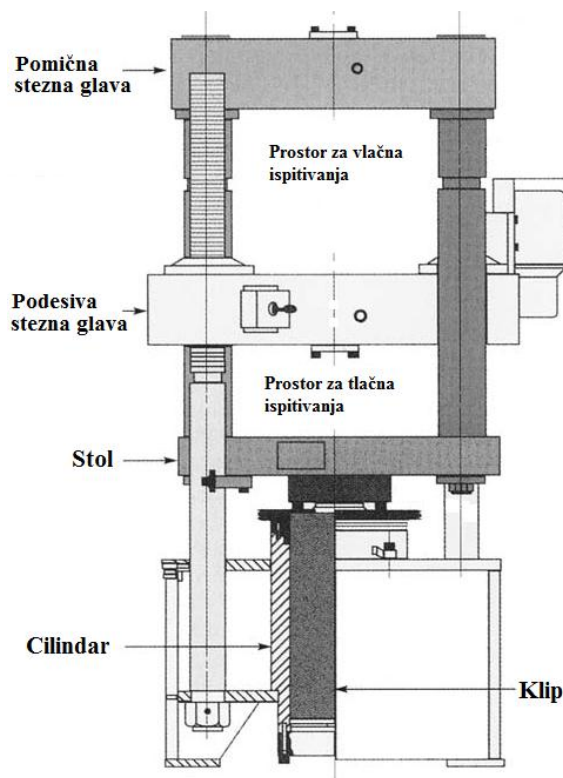
Statičko vlačno ispitivanje je temeljno ispitivanje svojstava materijala, u kojem je ispitni uzorak podvrgnut jednoosnom vlačnom opterećenju, u pravilu do loma. Rezultati dobiveni ispitivanjem se obično primjenjuju kod izbora materijala za određeni proizvod, te za kontrolu kvalitete i predviđanje kako će se materijal ponašati kod opterećenja koje nije jednoosno. Slika 1. prikazuje shemu statičkog vlačnog ispitivanja. Statičko vlačno ispitivanje se provodi tako da se ispitni uzorak stegne u uređaj za vlačno ispitivanje (kidalica). Nakon toga uređaj rasteže ispitni uzorak primjenom vlačne sile, pri čemu prirast istezanja mora biti vrlo mali, obično između 10^{-4} i 10^{-2} s^{-1} . Sa uređajem za mjerenje produljenja ili ekstenzimetrom, mjeri se koliko se ispitni uzorak produljuje između mjernih oznaka, koje su prije mjerenja označene na uzorku. Tijekom ispitivanja, u pravilnim intervalima, istodobno se zapisuju primijenjena sila i produljenje ispitnog uzorka, u pravilu do loma istog.



Slika 1. Shema statičkog vlačnog pokusa [1]

2.2. Ispitni uređaji (kidalice)

Ispitni uređaji za statička vlačna ispitivanja su najčešće univerzalni uređaji za ispitivanje vlačnih, tlačnih, i savojnih svojstava materijala. Uređaji su pogonjeni elektromehanički ili hidraulički. Glavna razlika između njih je u načinu generiranja sile, koja savija, tlači ili rasteže ispitni uzorak. Elektromehanički uređaji imaju električni motor, koji preko reduksijskog sustava i vretena pomiče stezne čeljusti gore ili dolje. I tako opterećuje ispitni uzorak tlačnom ili vlačnom silom. Brzina pomicanja čeljusti može se mijenjati promjenom brzine vrtnje elektromotora. Primjenom servo elektromotora ili koračnih elektromotora može se vrlo precizno upravljati brzinom pomaka steznih čeljusti. Hidraulični ispitni uređaji (prikazan na slici 2.) imaju jedan ili dva klipa koji pokreću stezne čeljusti. U ručno upravljanim uređajima operater podešava otvor igličastog ventila kako bi upravljao prirastom opterećenja. Za preciznije upravljanje, igličasti ventil se zamjenjuje električno upravljanim servo ventilom. Općenito, elektromehaničkim uređajima se može postići širi raspon brzina ispitivanja i veći razmak steznih čeljusti, dok su hidraulički uređaji isplativiji kod ispitivanja s većim silama.

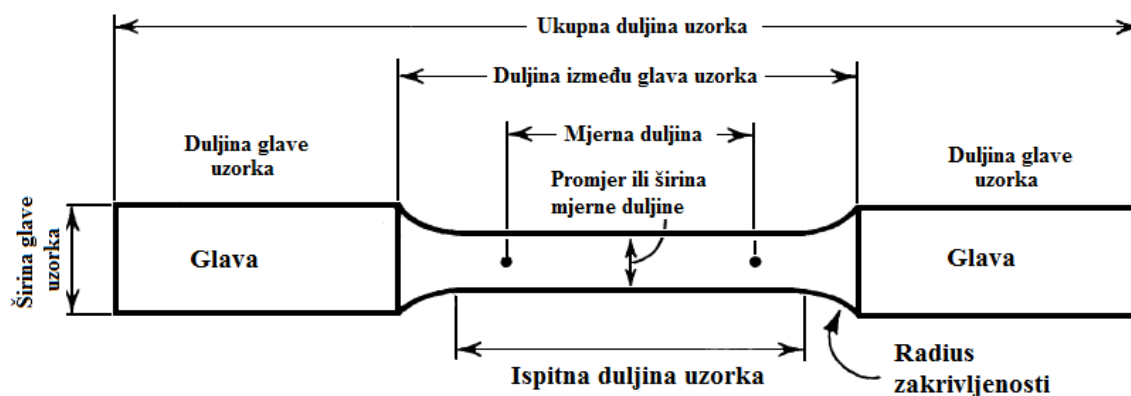


Slika 2. Univerzalni hidraulički ispitni uređaj [1]

Ispitni uređaji mjere opterećenje primijenjeno na ispitnom uzorku. Stoga uređaj za mjerenje sile mora biti umjeren u skladu s važećim normama.

2.3. Ispitni uzorci

Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka ovise o obliku i mjerama proizvoda od kojeg se ispitni uzorci izrađuju. Postoje obrađeni i neobrađeni ispitni uzorci. Neobrađeni ispitni uzorci imaju po cijeloj duljini jednak poprečni presjek, a izrađuju se od šipki, žica i sl, a obrađeni uzorci su na određenom dijelu stanjeni na određenu dimenziju. Oblik tipičnog obrađenog ispitnog uzorka je prikazan na slici 3. Ispitni uzorci uzeti iz komada lima mogu imati samo pravokutan poprečni presjek, a uzorci izrađeni iz debele ploče mogu imati plosnat ili okrugao poprečni presjek, kao što je vidljivo na slici 3. i 4.



Slika 3. Obađeni ispitni uzorak za statičko vlačno ispitivanje [2]



Slika 4. Ispitni uzorci okruglog i pravokutnog presjeka [7]

Površina poprečnog presjeka, S_0 , na mjernoj duljini je smanjena u odnosu na ostatak ispitnog uzorka, tako da se osigura deformacija i lom upravo na tom dijelu ispitnog uzorka. Mjerna duljina je područje na kojem se vrše mjerenja i smješteno je na sredini ispitnog uzorka. Prema normi HRN EN ISO 6892-1, odnos između mjerne duljine i površine poprečnog presjeka dan je izrazom:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (2-1)$$

gdje je:

- L_0 , mm - početna mjerna duljina,
- S_0 , mm² - površina poprečnog presjeka,
- k koeficijent proporcionalnosti.

Koeficijent proporcionalnosti iznosi 5,65. Ispitni uzorci ovih dimenzija su razmjerni ispitni uzorci. Međutim, mjerna duljina ne smije biti manja od 15 mm, a ako je površina poprečnog presjeka premala da zadovolji ovaj uvjet uz $k=5,65$, uzima se koeficijent k s većom vrijednosti, koja iznosi $k=11,3$ ili se koristi nerazmjeran ispitni uzorak. Duljina između zadebljanih krajeva (glava) ispitnog uzorka i krajeva mjerne duljine mora biti dovoljno velika, kako zadebljanje ne bi utjecalo na deformaciju mjerne duljine. Također mora postojati postupan prijelaz između ispitne duljine i glave ispitnog uzorka. Sve ostale mjere ispitnih uzoraka su dane u normi HRN EN ISO 6892-1. Iako se uzorci obrađuju na određene dimenzije, potrebno je, prije ispitivanja, mjerenjem utvrditi točne dimenzije svakog uzorka. Mjere se početna mjerna duljina, prijelazni polumjer zakrivljenosti i mjere poprečnog presjeka. Iz mjera poprečnog presjeka potrebno je izračunati početnu površinu poprečnog presjeka, koja se kasnije koristi za izračunavanje naprezanja i suženja. Dopuštena odstupanja mjerenih dimenzija dana su u normi HRN EN ISO 6892-1.

Za ispitne uzorke s pravokutnim poprečnim presjekom, isti se računa na slijedeći način:

$$S_0 = a_0 \times b_0 \quad (2-2)$$

gdje je:

- a_0 , mm - početna debljina plosnatog ispitnog uzorka,
- b_0 , mm - početna širina ispitne duljine plosnatog ispitnog uzorka.

Za ispitne uzorke s okruglim poprečnim presjekom, isti se računa na slijedeći način:

$$s_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} \quad (2-3)$$

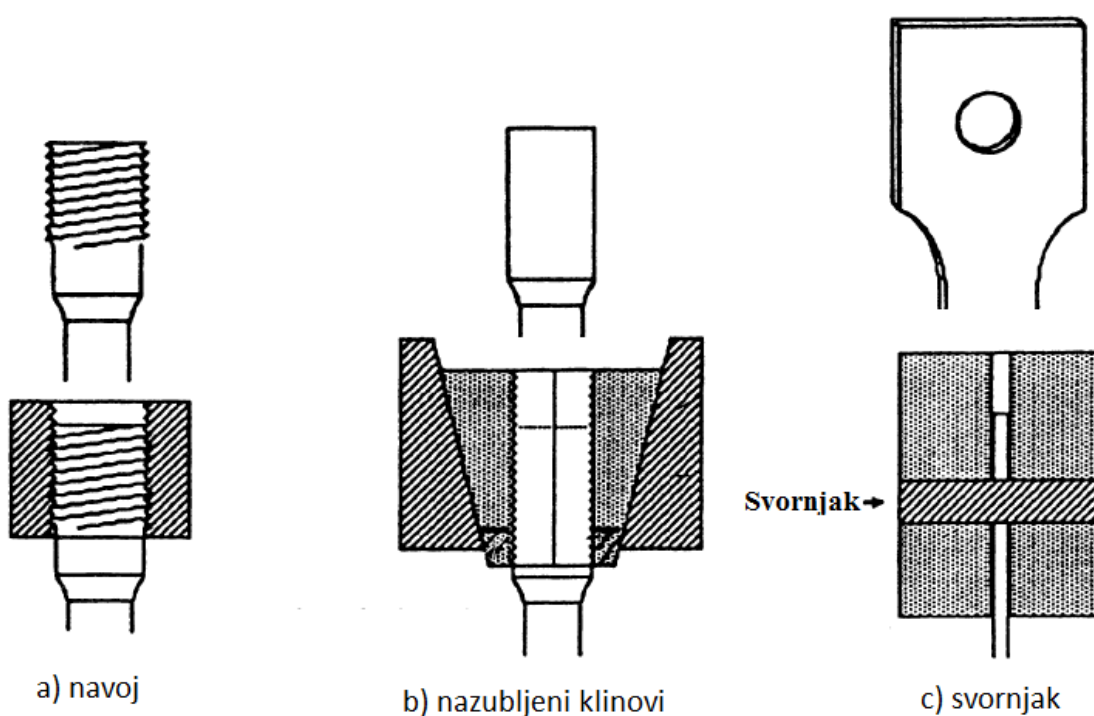
gdje je:

- d_0 , mm - početni promjer ispitne duljine ispitnog uzorka kružnog presjeka.

Izračunavanje ostalih oblika poprečnih presjeka opisano je u normi HRN EN ISO 6892-1.

Krajevi početne mjerne duljine moraju se označiti finim mjernim oznakama ili nježnim grebanjem, ali nikako zarezima koji bi mogli izazvati zarezno djelovanje i privremeni lom. Početna mjerna duljina mora se označiti s nesigurnošću od najviše $\pm 1\%$.

Glave ispitnog uzorka služe za stezanje istog u čeljusti kidalice, stoga moraju biti tako oblikovane da najbolje odgovaraju steznim napravama ispitnog uređaja i obliku ispitnog uzorka. Također moraju biti dovoljno čvrste da se ne oštete tijekom ispitivanja, jer bi to utjecalo na rezultate. Postoje različiti načini stezanja ispitnih uzoraka u stezne čeljusti, prikazanih na slici 5, npr: pomoću navoja, nazubljenih klinova, svornjaka i sl.



Slika 5. Primjeri stezanja ispitnih uzoraka u stezne čeljusti [2]

Potrebno je osigurati stezanje ispitnih uzoraka na takav način da primijenjena vlačna sila djeluje što je više moguće uz duž osi ispitnog uzorka, jer će protivnom ispitni uzorak biti opterećen i na savijanje i na vlak. Potrebno je posebno paziti da ne dođe do otkazivanja funkcije steznih čeljusti, tj. da one ne popuste tijekom ispitivanja i da ispitni uzorak ne ispadne iz njih. To može oštetiti ispitnu opremu i ozlijediti operatera koji upravlja ispitivanjem.

2.4. Uređaji za mjerenje produljenja, ekstenzimetri

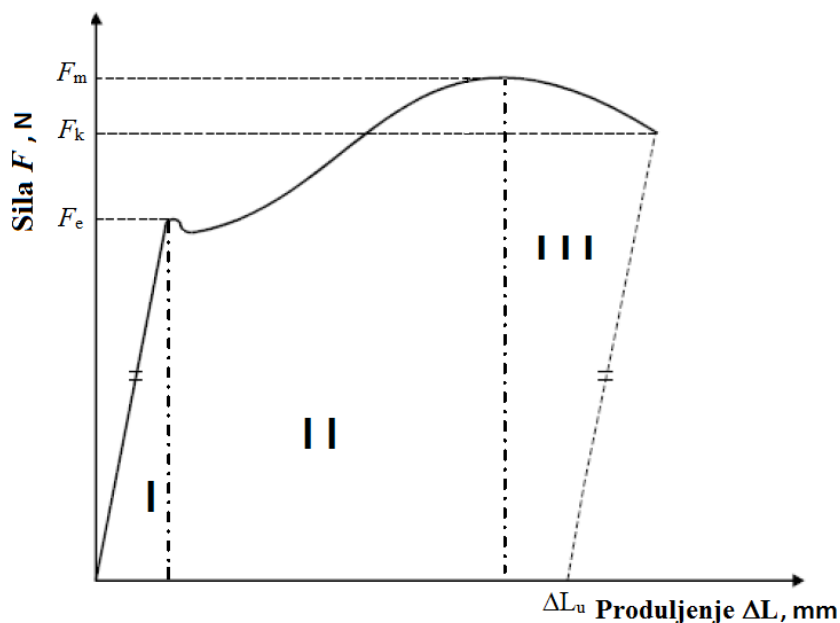
Nakon što je uzorak propisno stegnut u čeljusti kidalice i primijenjena je sila predopterećenja, potrebno je na njega postaviti uređaj za mjerenje produljenja, tj. ekstenzimetar. Produljenje se može odrediti i uz pomoć brzine pomaka, ali to se ne preporuča jer dolazi do pogreške zbog deformiranja ispitnog uređaja, koji nije idealno krut. Postoje različite vrste ekstenzimeta i uređaja za mjerenje produljenja, od onih koji se stavljaju direktno na uzorak, do različitih optičkih uređaja i lasera. Odabir koji uređaj primijeniti za mjerenje produljenja ovisi o više različitih faktora:

- širini mjernog polja i točnosti mjerila,
- načinu pričvršćivanja na ispitni uzorak,
- dimenzijama uzorka,
- okolišnim uvjetima ispitivanja...

Ekstenzimetri koji se stavljaju direktno na ispitni uzorak moraju biti dobro pričvršćeni za njega. Svako klizanje po ispitnom uzorku za vrijeme deformiranja daje kriva očitavanja. Sve vrste ekstenzimeta, koji se koriste kod ispitivanja, moraju biti umjereni, klasificirani i ovjereni u skladu s važećim normama.

2.5. Svojstva dobivena statičkim vlačnim ispitivanjem

Kao što je već spomenuto, tijekom ispitivanja istodobno se zapisuju osnovni podaci dobiveni statičkim vlačnim ispitivanjem, i to u pravilnim intervalima. To su sila i produljenje, pomoću kojih se iscrtava dijagram sila – produljenje. Slika 6. prikazuje karakterističan dijagram sila – produljenje za duktilne materijale.



Slika 6. Dijagram sila – produljenje [7]

Prvi dio dijagrama prikazuje linearnu ovisnost sile i produljenja. U ovom dijelu materijal se deformira elastično, tj. nakon rasterećenja materijal se vraća u prvobitno stanje bez trajne deformacije. Nakon sile tečenja F_e , materijal se počinje plastično deformirati i nema više linearne ovisnosti između sile i produljenja. Vidljivo je iz dijagrama da, iako sila malo padne materijal se i dalje rasteže. Razlog tome je pomicanje dislokacija unutar materijala. Nadalje opterećenje raste sve do najveće sile F_m , kada se javlja suženje na određenom dijelu ispitnog uzorka (pojava vrata). Nakon toga uzorak se nastavlja produljivati uz sve manju silu dok na kraju konačno ne pukne pri sili pucanja F_k . Konačno produljenje nakon ispitivanja iznosi $\Delta L_u = L_u - L_0$, mm.

Međutim, ovi podaci ne daju veliki uvid u ponašanje materijala, jer ne uzimaju u obzir dimenzije ispitnog uzorka i stoga ne opisuju mehanička svojstva ispitnog materijala. Stoga se pomoću slijedećeg izraza računa naprezanje u bilo kojem trenutku ispitivanja:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (2-4)$$

gdje je:

- F , N - vlačna sila u bilo kojem trenutku ispitivanja,
- S_0 , mm² - početna površina poprečnog presjeka ispitne duljine.

Naprezanje je važna veličina jer se može uspoređivati s veličinama koje su dobivene ispitivanjem sa ispitnim uzorcima drugačijih dimenzija. Treba napomenuti da ovo nije stvarno naprezanje koje se javlja u ispitnom uzorku jer se vlačna sila dijeli sa početnom površinom poprečnog presjeka, dok se tokom statičkog vlačnog ispitivanja poprečni presjek ispitnog uzorka smanjuje.

Isto tako produljenje ne uzima u obzir dimenzije uzorka, pa se pomoću njega računa istezanje, prema izrazu:

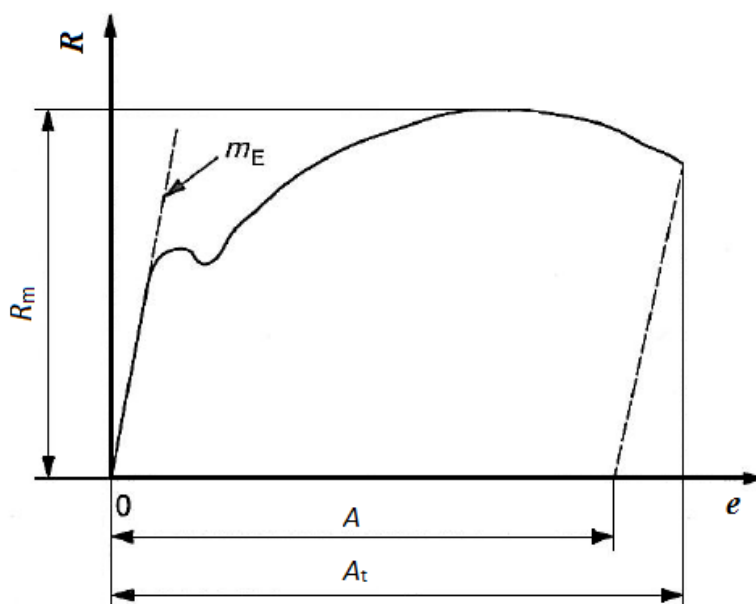
$$e = \Delta L / L_0 \quad (2-5)$$

gdje je:

- L_0 , mm - početna mjerna duljina,
- ΔL , mm - razlika između mjerne duljine u bilo kojem trenutku ispitivanja, L , i početne mjerne duljine L_0 , $(L - L_0)$.

Istezanje se izražava u postocima ili u mm/mm.

Sa ovim podacima konstruira se dijagram naprezanje – istezanje, koji je oblikom identičan dijagramu sila – produljenje. Na slici 7. prikazana je tipična krivulja naprezanje-istezanje i neke veličine koje se mogu odrediti iz nje.



Slika 7. Dijagram naprezanje – istezanje [4]

Pojmovi na slici 7:

- A – Istezljivost nakon loma,

- A_t - ukupna istezljivost pri lomu,
- e – istezanje,
- m_E – nagib krivulje naprezanje-istezanje u području elastične deformacije,
- R – naprezanje,
- R_m – vlačna čvrstoća.

Krivulja naprezanje – istezanje je gotovo neovisna o dimenzijama ispitnog uzorka, za razliku od krivulje sila – produljenje, koja će za ispitni uzorak od istog materijala, ali drugih dimenzija, biti drugačija. Nakon što je iscrtana krivulja naprezanje – istezanje, pomoću nje se mogu odrediti mnoga mehanička svojstva materijala.

2.5.1. Youngov modul elastičnosti, E

U prvom dijelu krivulje javlja se elastična deformacija, gdje je odnos između naprezanja i istezanja linearan. Materijal se u ovom području ponaša prema Hook-ovom zakonu, koji kaže da je istezanje linearno proporcionalno naprezanju:

$$\sigma = E \times e \quad (2-6)$$

gdje je E modul elastičnosti za određeni materijal u N/mm^2 . Modul elastičnosti ili Youngov modul elastičnosti je nagib krivulje naprezanje-istezanje u njezinom linearnom dijelu. To je osnovno fizikalno svojstvo svakog materijala.

Granica proporcionalnosti je trenutak kad prestaje linearan odnos između naprezanja i istezanja, pa malo povećanje naprezanja uzrokuje veće povećanje istezanja. Ako se uzorak rastereti prije nego je pređena granica proporcionalnosti, on se vraća u prvobitno stanje. Nakon granice proporcionalnosti dolazi granica elastičnosti, koja je vrlo važno svojstvo jer određuje točku do koje se ispitivanje može zaustaviti, a da se ne ošteti ispitni uzorak ili da se nepovoljno utječe na rezultate ispitivanja. To može biti važno ako se uoče nepravilnosti tijekom ispitivanja (ekstenzimetar ne bilježi produljenje ili se na dijagramu sila-produljenje upisuje sila, ali ne i produljenje...). Ako sila nije premašila granicu elastičnosti, uzorak se može rasteretiti, mogu se otkloniti nepravilnosti i ispitivanje se može ponovno pokrenuti, bez utjecaja na rezultate. Granica proporcionalnosti i granica elastičnosti se smatraju identičnima u većini realnih slučajeva. Teoretski, smatra se da je granica elastičnosti malo viša od granice

proporcionalnosti. Mjerene vrijednosti ovih granica jako ovise o osjetljivosti ekstenzimetra i o kvaliteti izvođenja ispitivanja.

2.5.2. Granice razvlačenja i vlačna čvrstoća

Gornja granica razvlačenja, R_{eH} , je naprezanje kod kojeg se pojavljuje prvo mjerljivo istezanje bez rasta naprezanja, tj. horizontalni dio krivulje naprezanje-istezanje kad se pojavi tečenje materijala. Određuje iz krivulje sila-produljenje ili indikatora vršnog opterećenja i dobiva se dijeljenjem te sile s početnom površinom poprečnog presjeka (vidi sliku 8).

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (2-7)$$

gdje je:

- F_{eH} , N - sila pri gornjoj granici razvlačenja.

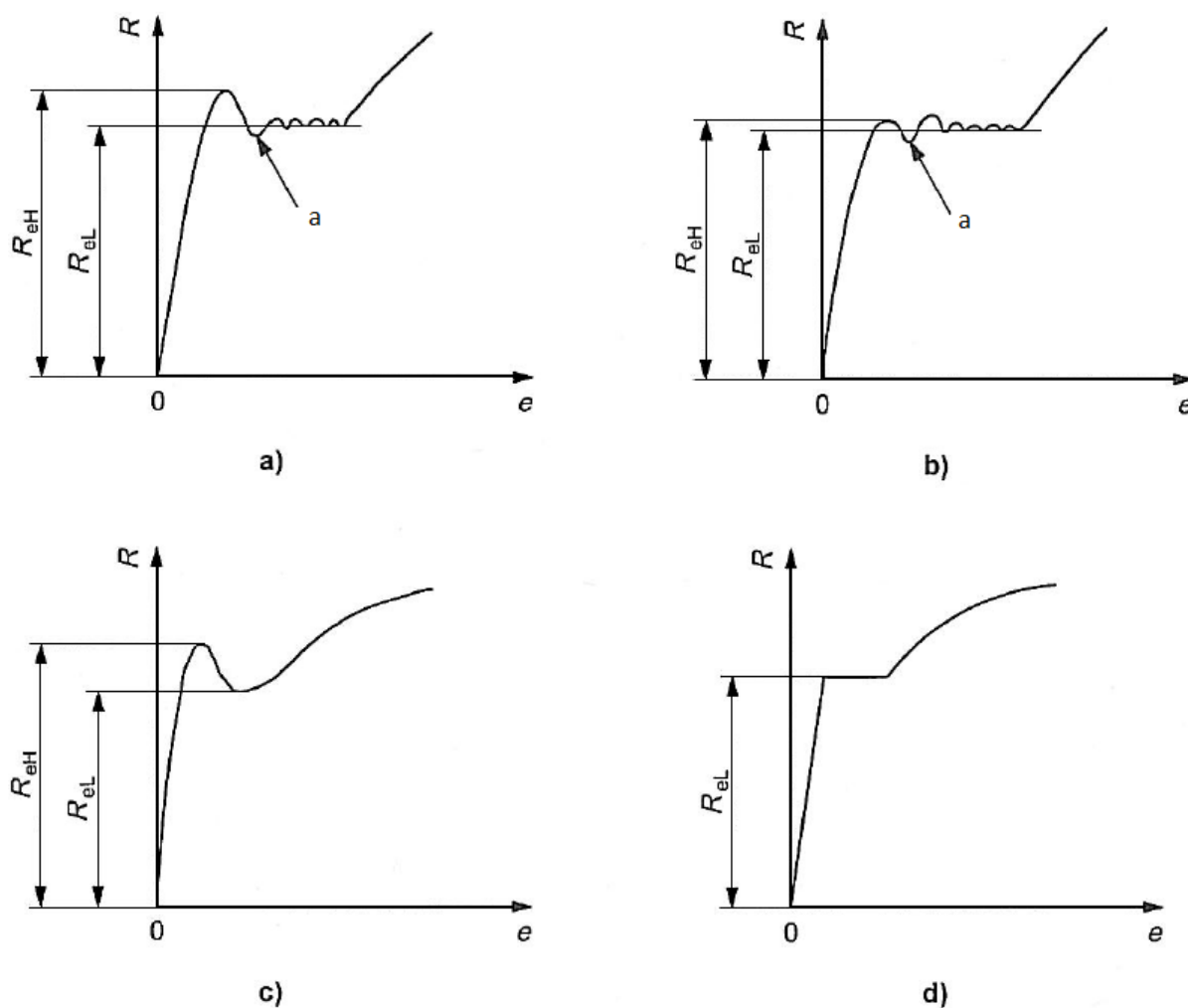
Donja granica razvlačenja, R_{eL} , je najmanje naprezanje tijekom tečenja materijala. Dobiva se dijeljenjem sile najmanjeg iznosa tijekom tečenja s početnom površinom poprečnog presjeka (vidi sliku 8).

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (2-8)$$

gdje je:

- F_{eL} , N - najmanja sila u području tečenja,

Prema HRN EN ISO 6892 – 1, R_{eL} se može zapisati kao najmanja vrijednost naprezanja u prvih 0,25% istezanja nakon R_{eH} , zanemarujući sve početne prolazne efekte.



Slika 8. Donja i gornja granica razvlačenja u različitim oblicima krivulja [4]

- a) i b) krivulje sa kolebanjem u području tečenja,
- c) krivulja bez kolebanja u području tečenja,
- d) krivulja bez R_{eH} .

Pojmovi na slici 8:

- R_{eH} , N/mm^2 - gornja granica razvlačenja,
- R_{eL} , N/mm^2 - donja granica razvlačenja,
- a – početni prolazni učinak.

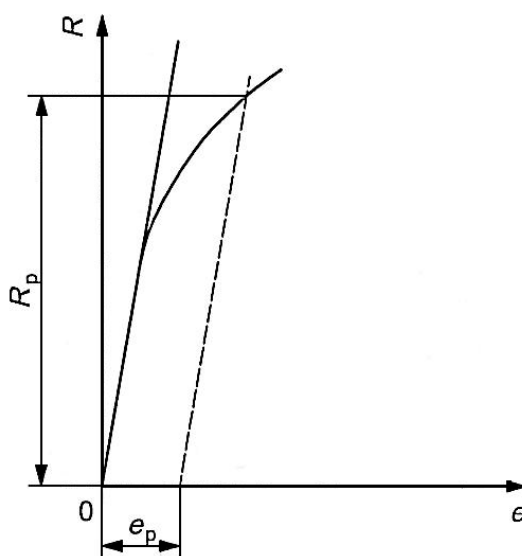
Kod materijala koji imaju krivulju naprezanje-istezanje kao što je to u slučaju d) na slici 8. ne mogu se odrediti obadvije granice razvlačenja već samo jedna, donja granica razvlačenja. Ovo svojstvo se određuje samo kod materijala koji imaju izraženu granicu razvlačenja.

Granica razvlačenja pri trajnom istezanju, R_p , je vrijednost naprezanja koja odgovara određenom trajnom (plastičnom) istezanju, npr. 0,2%. Određuje se iz krivulje sila-produljenje povlačenjem crte paralelne sa linearnim dijelom krivulje koja na osi apscise (produljenja) odsijeca iznos koji odgovara trajnom istezanju, npr. 0,2%. Ordinata sjecišta te paralele s krivuljom određuje silu koje pripada željenoj granici razvlačenja pri trajnom istezanju. Granica razvlačenja izračunava se dijeljenjem te sile s početnom površinom poprečnog presjeka ispitnog uzorka (vidi sliku 9).

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \quad (2-9)$$

gdje je:

- F_p , N - sila pri kojoj dolazi do određenog trajnog istezanja,



Slika 9. Granica razvlačenja pri određenom trajnom istezanju,[4]

Pojmovi na slici 9:

- e_p , mm/mm - određeno plastično istezanje,
- R_p , N/mm² - granica razvlačenja pri trajnom istezanju, plastično istezanje.

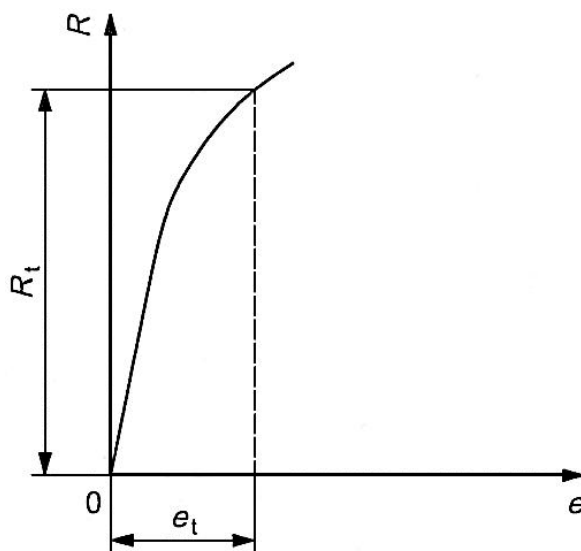
R_p se određuje u slučajevima kad nije moguće odrediti granicu razvlačenja R_e , što je dosta čest slučaj. Kod materijala koji ne pokazuju sklonost tečenju, pa nemaju jasno izraženu granicu razvlačenja u krivulji naprezanje-istezanje. Stoga se mora odrediti čvrstoća pri malom trajnom istezanju, npr. 0,2%. Kaljeni čelik je primjer materijala koji nema jasno izraženu granicu razvlačenja.

Određivanje granice razvlačenja pri ukupnom istezanju, R_t , je vrijednost naprezanja koje odgovara ukupnom (elastičnom i plastičnom) istezanju. Određuje se iz krivulje sila-produljenje povlačenjem crte paralelne s osi ordinata (os sile) koja na osi apscise (os produljenja) odsijeca unaprijed zadani iznos ukupnog produljenja. Ordinata sjecišta te paralele s krivuljom određuje silu koja pripada željenoj granici razvlačenja pri ukupnom istezanju. Granica razvlačenja se izračunava dijeljenjem te sile s početnom površinom poprečnog presjeka ispitnog uzorka (vidi sliku 10).

$$R_t = \frac{F_t}{S_0} \quad (2-10)$$

gdje je:

- F_t , N - sila pri kojoj dolazi do određenog ukupnog istezanja (elastično i plastično) ,



Slika 10. Granica razvlačenja pri ukupnom istezanju [4]

Pojmovi na slici 10:

- e_t , mm/mm - određeno trajno istezanje,
- R_t , N/mm² - granica razvlačenja pri ukupnom istezanju.

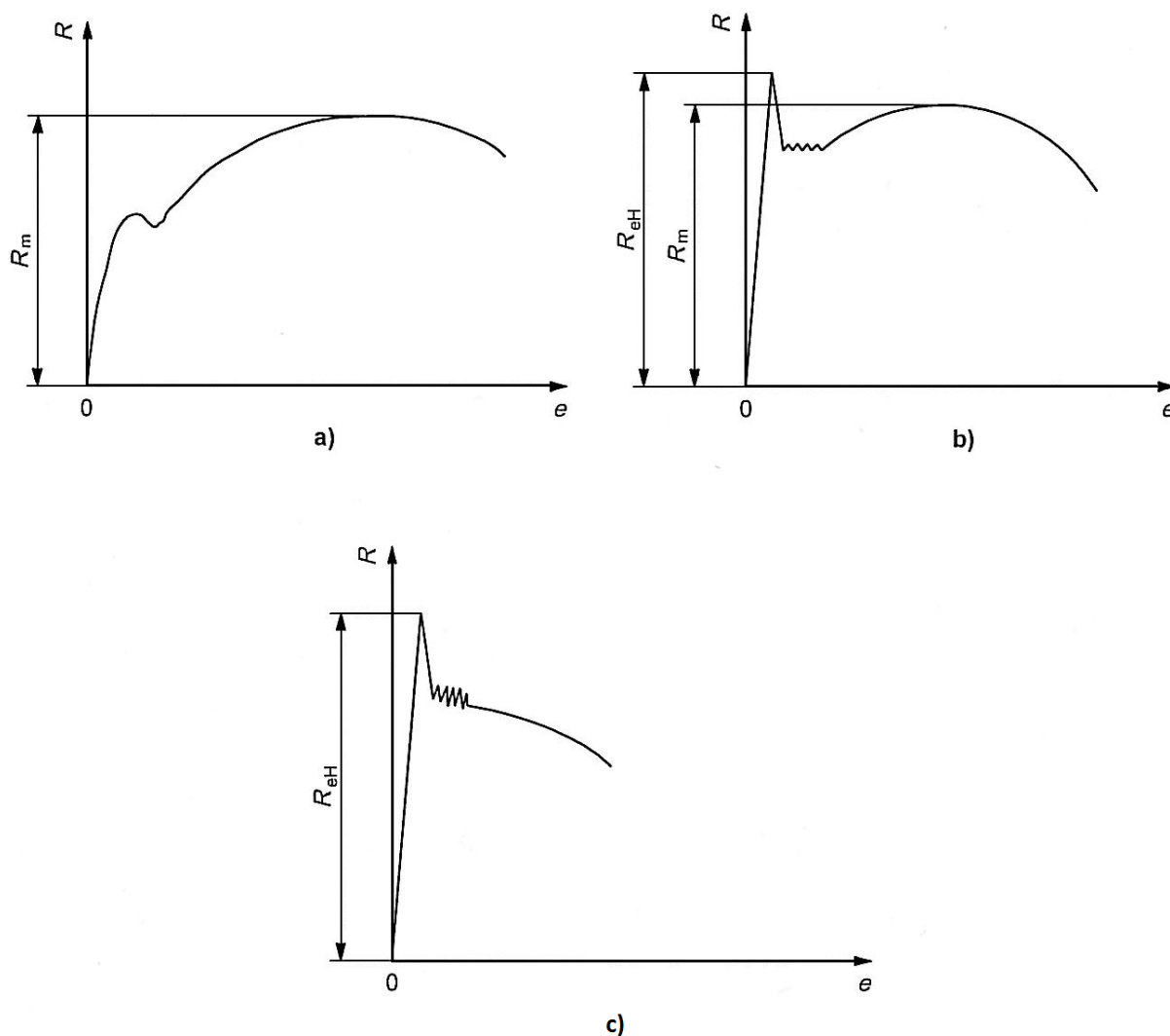
Vlačna čvrstoća, R_m , je vrijednost naprezanja koje se javlja pri najvećoj sili. Određuje se iz krivulje sila-produljenje i dobiva se dijeljenjem najveće sile sa početnom površinom poprečnog presjeka (vidi sliku 11).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (2-11)$$

gdje je:

- F_m , N - najveća sila tijekom ispitivanja.

Vlačna čvrstoća je svojstvo koje ne opisuje točno naprezanje koje se javlja pri najvećoj sili, jer se sila dijeli sa početnim poprečnim presjekom, a ne stvarnim koji je manji. Također u području najveće sile dolazi do pojave vrata na ispitnom uzorku, u kojem se javlja naprezanje koje više nije jednoosno, već je mnogo složenije. No, zbog dugog korištenja ovog svojstva da se opiše čvrstoća materijala, lakog mjerenja i ponovljivosti tijekom ispitivanja, koristi se za specifikaciju materijala i kod kontrole kvalitete. Na slici 11. prikazano je određivanje R_m u različitim krivuljama naprezanje-istezanje.



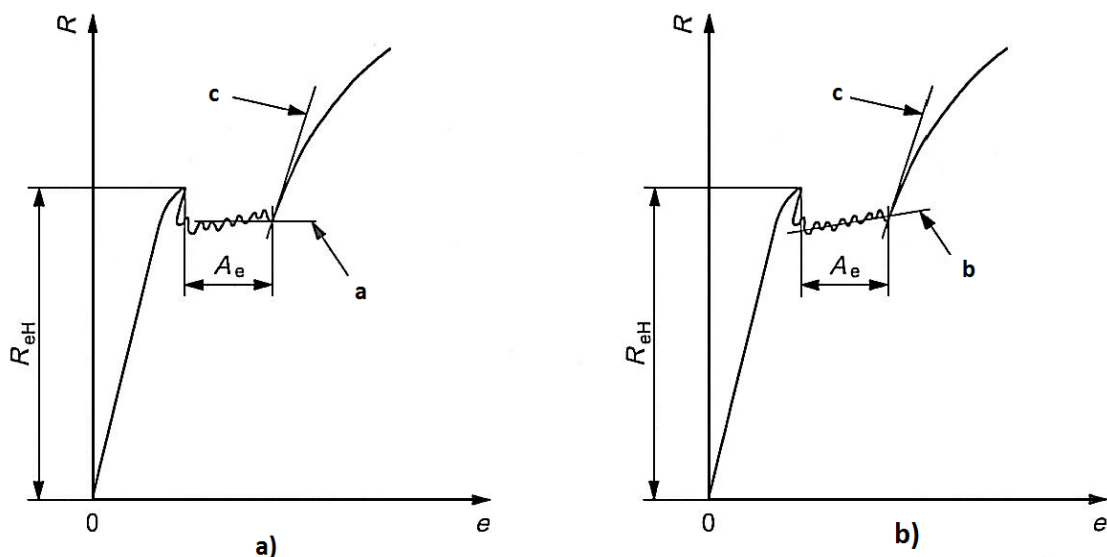
Slika 11. Različite krivulje naprezanje-istezanje i određivanje R_m [4]

- a) Naprezanje R_m je veće od R_{eH} ($R_{eH} < R_m$),
- b) naprezanje R_{eH} je veće od R_m ($R_{eH} > R_m$),
- c) poseban slučaj ponašanja materijala prilikom vlačnog ispitivanja.

Za materijale koji pokazuju ponašanje kao što je slučaj c) na slici 11. ne može se odrediti vlačna čvrstoća. Kod nekih materijala, naročito krhkih, vlačna čvrstoća može biti jednaka čvrstoći pucanja ispitnog uzorka.

2.5.2. Istezljivost A i suženje Z

Istezanje pri granici razvlačenja, A_e , je istezanje koje se javlja kod tečenja materijala i može se odrediti samo kod materijala koji imaju jasno vidljivu granicu razvlačenja, odnosno prikazuju sklonost tečenju. Određuje se iz krivulje sila-produljenje, tako da se od produljenja, kad počne tečenje, oduzme produljenje pri R_{eH} . Produljenje na početku očvršćivanja materijala je definirano presjekom horizontalne linije kroz zadnji lokalni minimum, ili regresijskim pravcem kroz područje tečenja prije očvršćivanja i linije koja odgovara najvećem nagibu krivulje koju se pojavljuje na samom početku očvršćivanja materijala (vidi sliku 12).

**Slika 12. Metode određivanja A_e [4]**

- a) metoda vodoravne linije kroz zadnji lokalni minimum,
- b) regresijska metoda.

Pojmovi na slici 12:

- A_e – istežanje na granici razvlačenja,
- a – vodoravna linija kroz lokalni minimum prije očvršćivanja,
- b – regresijska linija kroz raspon tečenja, prije očvršćivanja,
- c – linija koja odgovara najvećem nagibu krivulje na početku očvršćivanja.

Korištena metoda a) ili b) prema slici 12. mora biti istaknuta u izvješću o ispitivanju.

Trajno istežanje pri najvećoj vlačnoj sili, A_g , je trajno istežanje koje se javlja u trenutku kad se očita najveća vlačna sila, F_m (vidi sliku 13). Određuje se oduzimanjem elastičnog istežanja od ukupnog istežanja, očitano na ekstenzimetru, pri najvećoj sili u dijagramu sila-produljenje. Računa se prema slijedećem izrazu:

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \right) \times 100 \quad (2-12)$$

gdje je:

- L_e , mm - mjerna duljina ekstenzimetra,
- m_E , N/mm² - nagib elastičnog (linearnog) dijela krivulje naprezanje-istežanje,
- R_m , N/mm² - vlačna čvrstoća,
- ΔL_m , mm - produljenje pri najvećoj sili.

Ukupno istežanje pri najvećoj sili, A_{gt} , je ukupno istežanje (elastično i plastično) pri najvećoj vlačnoj sili u dijagramu sila-produljenje (vidi sliku 13), a računa se prema slijedećem izrazu:

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} \times 100 \quad (2-13)$$

gdje je:

- L_e , mm - mjerna duljina ekstenzimetra,
- ΔL_m , mm - produljenje pri najvećoj sili.

Ukupno istežanje pri lomu, A_t , je ukupno istežanje (elastično i plastično) u trenutku loma ispitnog uzorka (vidi sliku 13), a računa se prema slijedećem izrazu:

$$A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} \times 100 \quad (2-14)$$

gdje je:

- ΔL_f , mm - produljenje nakon loma,
- L_e , mm - mjerna duljina ekstenzimetra.

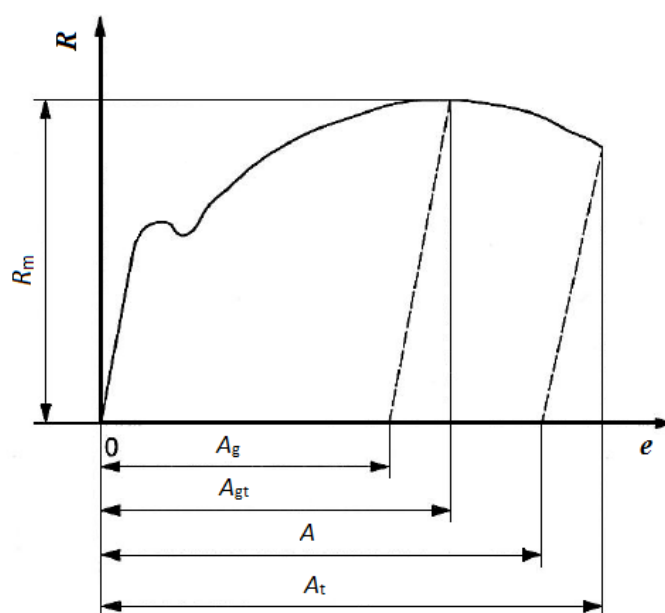
Istezljivost nakon loma, A , je trajno istezanje utvrđeno nakon loma ispitnog uzorka (vidi sliku 13). Za određivanje ovog istezanja, oba dijela ispitnog uzorka se moraju pažljivo sastaviti da njihove osi budu na jednome pravcu. Zatim se mjeri konačna mjerna duljina nakon loma, L_u . Za vrijeme mjerenja na mjernoj duljini posebno treba paziti na dobro međusobno nalijeganje prelomnih površina ispitnog uzorka. To je posebno važno kod ispitnih uzorka s malom površinom poprečnog presjeka i kod ispitnih uzoraka s malom istezljivošću. Istezljivost nakon loma, A , računa se prema slijedećem izrazu:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2-15)$$

gdje je:

- L_0 , mm - početna mjerna duljina,
- L_u , mm - konačna mjerna duljina nakon loma.

Ako se produljenje nakon loma mjeri ekstenzimetrom, potrebno je od ukupnog produljenja oduzeti elastično produljenje, kako bi se dobila konačna mjerna duljina nakon loma, L_u . Rezultat ovakvog određivanja važi samo kad stvaranje vrata i lom nastupi unutar mjerne duljine ekstenzimetra.



Slika 13. Određivanje istezanja, A , A_t , A_g , A_{gt} [4]

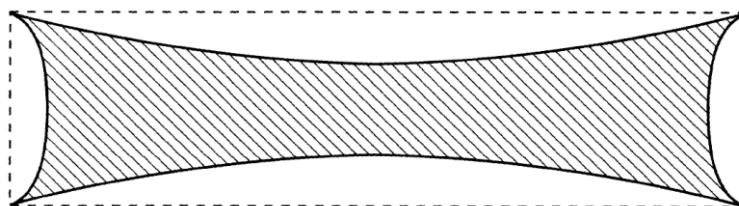
Suženje ili kontrakcija, Z , je definirana kao razlika između početne površine poprečnog presjeka ispitnog uzorka i najmanje površine poprečnog presjeka nakon ispitivanja, tj nakon loma ispitnog uzorka. Stoga je potrebno oba dijela ispitnog uzorka, nakon loma, pažljivo sastaviti, da njihove osi budu na jednom pravcu. Zatim treba izmjeriti najuži promjer ispitnog uzorka i pomoću njega izračunati najmanju površinu poprečnog presjeka nakon loma, S_u . Zatim se suženje računa prema izrazu:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \quad (2-16)$$

gdje je:

- S_0 , mm² - početna površina poprečnog presjeka,
- S_u , mm² - najmanja površina poprečnog presjeka nakon loma.

Suženje se određuje isključivo na ispitnim uzorcima kružnog poprečnog presjeka, jer nakon suženja poprečni presjek ostane okrugao ili gotovo okrugao. Pa je moguće izmjeriti mjere suženog poprečnog presjeka. To nije slučaj kod ispitnih uzoraka s pravokutnim poprečnim presjekom, jer njihovi kutovi sprječavaju jednoliku deformaciju i zbog toga, nakon loma, oblik suženog poprečnog presjeka više nije pravokutan (slika 14).



Slika 14. Skica poprečnog presjeka pravokutnog ispitnog uzorka nakon loma [2]

Slika 14. prikazuje poteškoće određivanja mjera poprečnog presjeka pravokutnog ispitnog uzorka nakon loma (širinu i debljinu), pa je teško odrediti i najmanju površinu poprečnog presjeka nakon loma, a samom time i suženje. Stoga se to na ovakvim uzorcima ni ne određuje. I kod ispitnih uzoraka s malom površinom poprečnog presjeka, npr. žice, mogu se javiti poteškoće kod određivanja suženja Z .

2.6. Brzine ispitivanja (razlike između stare norme HRN EN ISO 10002-1 i nove norme HRN EN ISO 6892-1)

Iako su norme većim dijelom slične ili gotovo iste, ipak postoje neke značajne razlike i to u pogledu brzine ispitivanja. Dok se u staroj normi preporučuje jedna metoda upravljanja brzinom ispitivanja, u normi HRN EN ISO 6892-1 navode se dva načina upravljanja brzinom ispitivanja. To su metoda A i metoda B. Metoda B je jednaka metodi u staroj normi HRN EN ISO 10002-1. Metoda A je razvijena u svrhu smanjivanja varijacija brzine ispitivanja kad se utvrđuju parametri osjetljivi na brzinu istezanja, kao što su R_p , R_{eH} , R_{eL} , R_m ... Općenito, što su brzine veće, veće su i čvrstoće, a smanjuje se istezljivost.

U metodi A postoje dva načina upravljanja brzinom istezanja. Prvi način je upravljanje samom brzinom istezanja $\dot{\epsilon}_{Le}$, pomoću povratnih informacija o produljenju, dobivenih od ekstenzimetra. Drugi način je upravljanje procijenjenom brzinom istezanja na duljini ispitnog uzorka $\dot{\epsilon}_{Le}$. Njom se upravlja brzinom pomaka, a dobije se tako da se željena brzina istezanja pomnoži s ispitnom duljinom. Ako se materijal deformira homogeno pri konstantnoj sili, brzina prirasta istezanja, $\dot{\epsilon}_{Le}$, i procijenjena brzina prirasta istezanja na ispitnoj duljini ispitnog uzorka, $\dot{\epsilon}_{Le}$, su približno iste. Različite su ako materijal pokazuje diskontinuirano ili nazubljeno deformiranje. Ako se sila povećava, procijenjena brzina prirasta istezanja može biti bitno ispod željene brzine istezanja zbog popustljivosti ispitnog uređaja.

Za određivanje R_{eH} , R_p ili R_t , norma HRN EN ISO 6892-1, propisuje slijedeće brzine istezanja:

- Raspon 1: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,000\ 07\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$.
- Raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$ (preporučeno osim ako nije naznačeno drugačije).

Brzina istezanja $\dot{\epsilon}_{Le}$ mora biti što je više ravnomjerna do određivanja R_{eH} , R_p ili R_t . Tijekom određivanja ovih svojstava materijala, brzina prirasta istezanja mora biti u jednom od dva propisana raspona.

Nakon što se odredi gornja granica razvlačenja R_{eH} , procijenjena brzina istezanja na ispitnoj duljini ispitnog uzorka, $\dot{\epsilon}_{Lc}$, mora biti u jednom od slijedećih raspona sve dok ne završi područje tečenja.

- Raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$ (preporučeno ako se određuje R_{eL}).
- Raspon 3: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$.

Nakon što su određena potrebna vlačna svojstva oko granice razvlačenja, procijenjena brzina prirasta istezanja na ispitnoj duljini ispitnog uzorka, $\dot{\epsilon}_{Lc}$, mora se promijeniti na jednu od slijedećih propisanih vrijednosti:

- Raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$.
- Raspon 3: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$.
- Raspon 4: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$ ($0,4\ min^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od 20%) (preporučeno ako nije naznačeno drugačije).

No ako je svrha ispitivanja odrediti samo vlačnu čvrstoću, tad procijenjena brzina istezanja može biti kroz cijelo ispitivanje $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002$ ili $0,0067\ s^{-1}$, tj. može imati vrijednost kako je naznačeno u rasponu 3. odnosno 4.

Metoda B propisuje brzine ispitivanja prema vrsti materijala, odnosno ovisi o svojstvima materijala koji se ispituje. U tablici 1. navedene su propisane vrijednosti brzine ispitivanja, tj. prirasta naprežanja, u elastičnom području sve do gornje granice razvlačenja. Iznos brzine ovisi o iznosu modula elastičnosti za pojedini materijal.

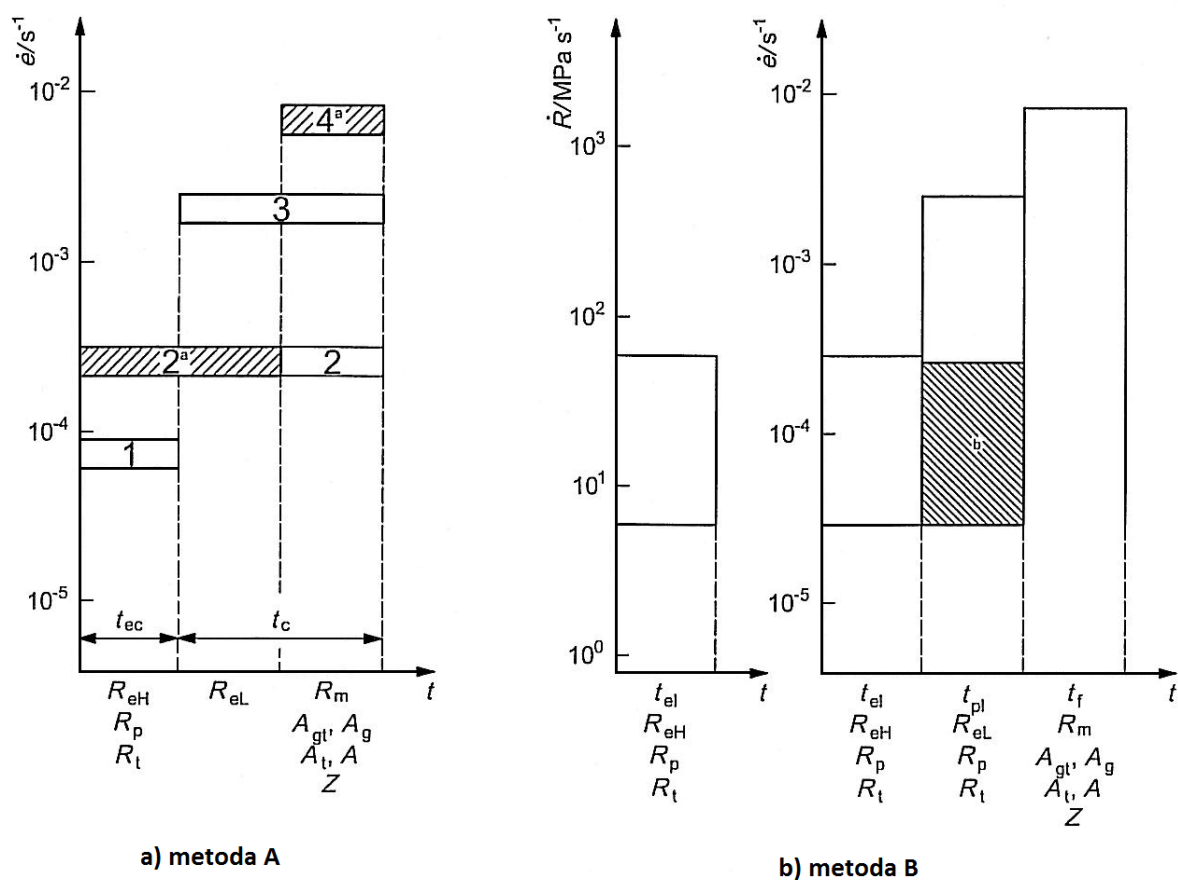
Tablica 1. Propisana brzina naprežanja [4]

Modul elastičnosti materijala	Brzina prirasta naprežanja
-------------------------------	----------------------------

E N/mm ²	\dot{R} N/mm ² s ⁻¹	
	min.	max
<150 000	2	20
≥150 00	6	60

Brzina ispitivanja se mora održavati konstantnom što je više moguće i unutar granica propisanih u tablici 1.

Kad se određuje donja granica razvlačenja, brzina istezanja u području ispitne duljine mora za vrijeme tečenja biti između $0,00025 \text{ s}^{-1}$ i $0,0025 \text{ s}^{-1}$. U području ispitne duljine brzina istezanja mora biti što je više moguće stalnija. Isto vrijedi i kod određivanja granica razvlačenja pri trajnom istezanju (plastično istezanje) i granica razvlačenja pri ukupnom istezanju (R_p i R_t). Nakon određivanja potrebnih vlačnih svojstava, brzina ispitivanja se može povećati na brzinu istezanja (ili ekvivalentnu brzinu razdvajanja), ali ne veću od $0,008 \text{ s}^{-1}$. Slika 15. prikazuje brzine istezanja koje se koriste u metodi A, odnosno B.



Slika 15. Brzine istezanja u metodama A i B [4]

Pojmovi na slici 15:

$\dot{\epsilon}$ – prirast istezanja,

\dot{R} – prirast naprezanja,

t – vrijeme trajanja vlačnog ispitivanja,

t_c – vrijeme upravljanja steznim čeljustima,

t_{ec} – vrijeme upravljanja ekstenzimetrom ili vrijeme upravljanja steznim čeljustima,

t_{el} – raspon vremena (elastično područje) za određivanje parametara,

t_f – raspon vremena (obično do loma) za određivanje parametara,

t_{pl} – raspon vremena (plastično područje) za određivanje parametara,

1 Raspon 1: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,000\ 07\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$

2 Raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$

3 Raspon 3: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,002\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$

4 Raspon 4: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,006\ 7\ s^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od $\pm 20\%$ ($0,4\ min^{-1}$, sa relativnim odstupanjem od 20%).

2.7. Određivanje mjerne nesigurnosti prema normi HRN EN ISO 6892-1 [4]

Nakon izvedenih ispitivanja poželjno je procijeniti i izračunati mjernu nesigurnost povezanu sa rezultatima ispitivanja. Nekad je to i prijeko potrebno da se utvrde granice netočnosti ispitnih rezultata. Određivanjem nesigurnosti mjerenja moguće je ustanoviti koliko ispitna oprema, operater ili uvjeti ispitivanja utječu na nesigurnost rezultata. Iako norma propisuje kako odrediti nesigurnost kod vlačnih ispitivanja, nije moguće potpuno odrediti sve utjecaje koji djeluju na rasipanje podataka, tj. mjernu nesigurnost.

Prvi korak, kod određivanja nesigurnosti, je popisati sve veličine kojima je potrebno izračunati nesigurnost. Zatim je potrebno odrediti sve moguće izvore nesigurnosti, koji utječu na veličine kojima se procjenjuje nesigurnost. Npr. kod mjerenja produljenja, izvor nesigurnosti je ekstenzimetar. Zatim se određuje tip određivanja standardne nesigurnosti u , tip A ili tip B.

Prvi način određivanja standardne nesigurnosti (tip A) je ponavljanje mjerenja, a nesigurnost se računa prema slijedećem izrazu:

$$u = \frac{s \times t(P, f)}{\sqrt{n}} \quad (2-17)$$

gdje je:

- s – standardna devijacija mjernih rezultata,
- t – faktor studentove t – razdiobe,
- P – razina pouzdanosti,
- f – stupnjevi slobode $(n - 1)$,
- n – broj promatranih rezultata mjerenja koja su provedena pod normalnim uvjetima.

Kako bi nesigurnost bila što preciznija, potrebno je obaviti što je više mjerenja, a nikako manje od 5.

Način B se temelji na određivanju nesigurnosti iz drugih izvora, npr. certifikata umjeravanja, tolerancija, procjene stručnjaka... Iz ovih izvora se određuje interval u kojem se smatra da leži promatrana veličina. Zatim se standardna nesigurnost računa prema slijedećem izrazu:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2-18)$$

gdje je a pola duljine intervala na kojem se smatra da leži veličina.

Nakon toga, potrebno je za svaki izvor nesigurnosti izračunati standardnu nesigurnost prema tipu A ili tipu B. Često na neke promatrane veličine utječe više izvora nesigurnosti, npr. na nesigurnost naprezanja utječe nesigurnost određivanja primijenjene sile i nesigurnost određivanja površine poprečnog presjeka, na koji pak utječe nesigurnost mjerenja poprečnog presjeka (promjera, širine i debljine). Za takve veličine potrebno je odrediti kombiniranu nesigurnost, koja se određuje prema slijedećem izrazu:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad (2-19)$$

gdje je:

- c_i – koeficijent osjetljivosti povezan se x_i ,
- $u(x_i)$ – standardna nesigurnost veličine x_i .

Na nesigurnost početne površine poprečnog presjeka utječu nesigurnosti mjera poprečnog presjeka, duljina i širina, ili promjer kod ispitnog uzorka kružnog poprečnog presjeka. Nesigurnost početne površine poprečnog presjeka, kod uzoraka s pravokutnim presjekom, računa se prema izrazu.

$$u_{s_0} = \sqrt{b_0^2 \times u_{a_0}^2 + a_0^2 \times u_{b_0}^2} \quad (2-20)$$

gdje je:

- u_{a_0} – nesigurnost početne debljine ispitnog uzorka,
- u_{b_0} – nesigurnost početne širine ispitnog uzorka.

Nesigurnost površine poprečnog presjeka kod ispitnih uzoraka s okruglim presjekom računa se prema izrazu:

$$u_{s_0} = \sqrt{\frac{d_0^2 \pi^2 u_{d_0}^2}{4}} \quad (2-21)$$

gdje je:

- u_{d_0} – nesigurnost početnog promjera ispitnog uzorka,

Na isti način se računa i nesigurnost konačne površine poprečnog presjeka u_{s_u} . Ali umjesto početnih vrijednosti debljine, širine ili promjera, uzimaju se konačne vrijednosti debljine, širine ili promjera ispitnog uzorka nakon ispitivanja.

Na nesigurnost naprezanja utječe nesigurnost sile i površine poprečnog presjeka, stoga se kombinirana nesigurnost naprezanja računa prema slijedećem izrazu:

$$u_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{1}{s_0}\right)^2 u_F^2 + \left(\frac{F}{s_0^2}\right)^2 u_{s_0}^2} \quad (2-22)$$

gdje je:

- u_F – nesigurnost sile u bilo kojem trenutku ispitivanja,
- u_{s_0} – nesigurnost početne širine ispitnog uzorka.

Na ovaj način se računa i nesigurnost u_{ReL} , u_{ReH} i u_{Rm} . Samo se mora uzeti odgovarajuća sila za svaku čvrstoću.

Na nesigurnost istezanja utječe nesigurnost produljenja i nesigurnost početne mjerne duljine, pa se kombinirana nesigurnost istezanja računa prema slijedećem izrazu:

$$u_{\epsilon} = \sqrt{\left(\frac{1}{L_0}\right)^2 u_e^2 + \left(\frac{e}{L_0^2}\right)^2 u_{L_0}^2} \quad (2-23)$$

gdje je:

- u_e – nesigurnost produljenja u bilo kojem trenutku ispitivanja,
- u_{L_0} – nesigurnost početne mjerne duljine ispitnog uzorka.

Nesigurnost konačnog istezanja računa se prema sljedećem izrazu:

$$u_A = \sqrt{\left(\frac{1}{L_0^2}\right) u_{L_u}^2 + \left(\frac{1}{L_0} - \frac{L_u - L_0}{L_0^2}\right)^2 u_{L_0}^2} \quad (2-24)$$

gdje je:

- u_{L_u} – nesigurnost konačne mjerne duljine uzorka.

Nesigurnost suženja Z , računa se prema sljedećem izrazu:

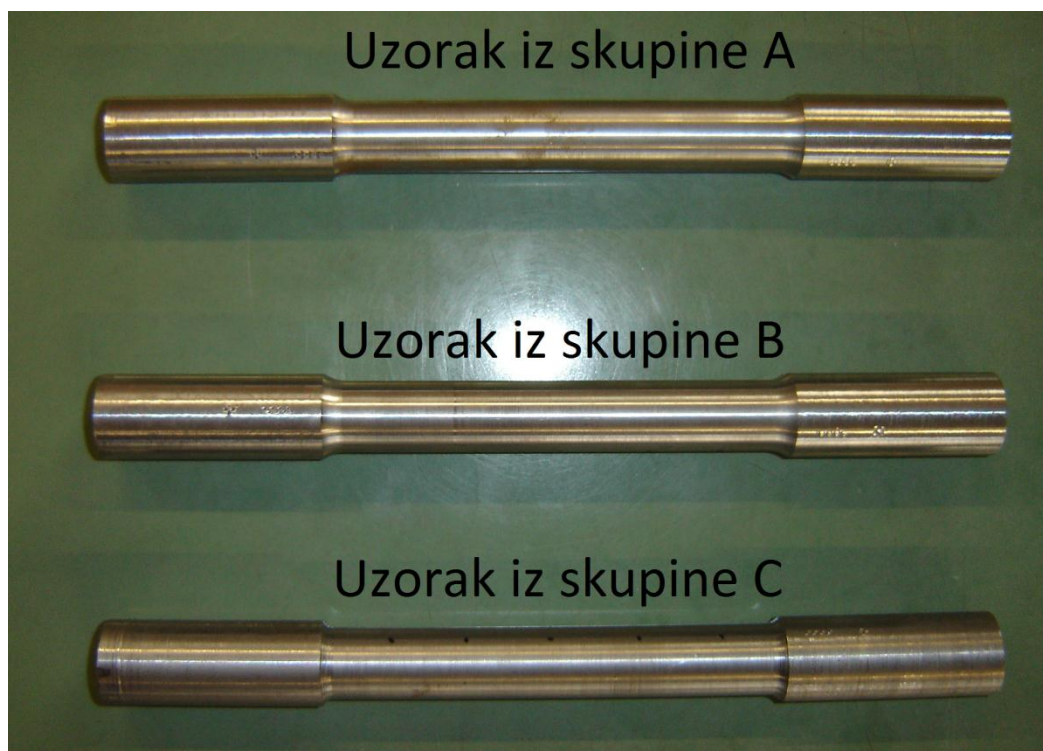
$$u_Z = \sqrt{\frac{s_u^2}{s_0^4} u_{s_0}^2 + \frac{1}{s_0^2} u_{s_0}^2} \quad (2-25)$$

Sve ove nesigurnosti odgovaraju iznosu u jedne standardne devijacije plus ili minus, na normalnoj razdiobi koja predstavlja osnovni skup promatrane veličine i ima razinu pouzdanosti 68.27%. Za izračunavanje proširene standardne nesigurnosti U , standardna nesigurnost se množi sa faktorom pokrivanja, koji se odabire prema potrebnoj razini pouzdanosti. Najčešće korišteni je faktor 2, koji odgovara razini pouzdanosti od 95,4%. Ako je potrebna još veća pouzdanost množi se sa faktorom 3, koji odgovara razini pouzdanosti od 99,73%.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Ispitni uzorci

Ispitivanje se vršilo na trideset uzoraka koji su podijeljeni u tri skupine (svaka skupina ima 10 uzoraka), prema načinu strojne obrade. Skupine su označene sa slovima A, B i C. U skupinu A i B spadaju ispitni uzorci obrađeni na CNC obradnom centru i razlikuju se po kvaliteti obrade, dok u skupinu C spadaju ispitni uzorci obrađeni na univerzalnoj tokarilici. Na slici 16. prikazan je po jedan ispitni uzorak iz svake skupine. Materijal ispitnih uzoraka je toplo valjani čelik za cementiranje C 15 E4, prema normi ISO 4957: 1980.

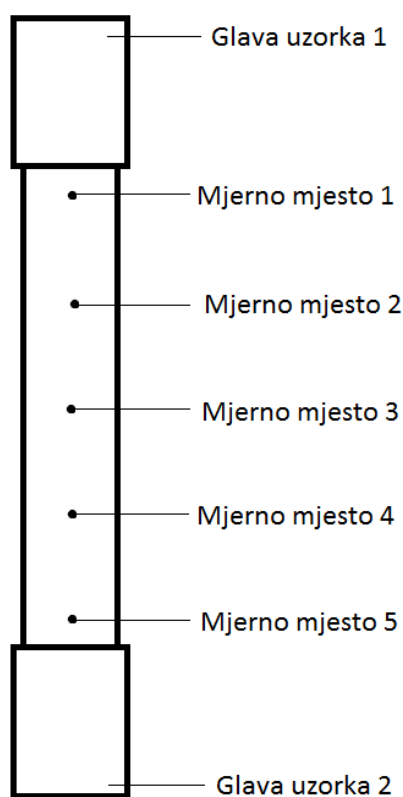


Slika 16. Ispitni uzorci iz pojedinih skupina

Uzorci su okruglog poprečnog presjeka, početne mjerne duljine $L_0 = 100$ mm, i početnog promjera poprečnog presjeka $d_0 = 20$ mm.

3.1.1. Mjerenje promjera d_0 i određivanje početne površine S_0

Iako su poznate grube mjere ispitnih uzoraka, prije ispitivanja bilo je potrebno preciznije odrediti površinu poprečnog presjeka S_0 , pa je na svakom uzorku trebalo preciznije izmjeriti d_0 . Mjerenje je vršeno na pet točaka na mjernoj duljini. Na slici 17. skicirana su mjesta mjerenja d_0 na ispitnom uzorku. Na svakoj točki izmjerene su 3 vrijednosti d_0 . Kad je izmjerena jedna vrijednost d_0 , uzorak je zarotiran za $\sim 30^\circ$ i na istoj točki je izmjerena druga vrijednost d_0 , zatim je uzorak ponovno zarotiran i izmjerena je treća vrijednost d_0 . Postupak se ponavlja za svih 5 točaka na mjernoj duljini.

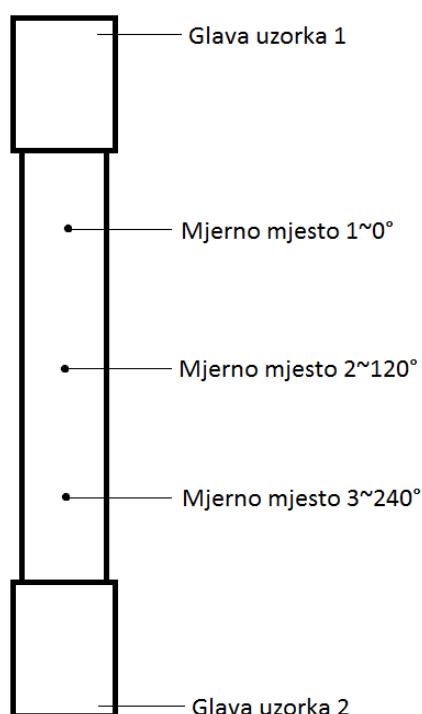


Slika 17. Skica mjernih mjesta na ispitnim uzorcima

Mjerna mjesta su određena tako da mjerno mjesto 3 bude otprilike na sredini uzorka. Mjerna mjesta 1 i 5 budu blizu steznih glava, ali da na njih ne utječe prelazni polumjer zakrivljenosti između glave i mjerne duljine. Mjerno mjesto 2 je između točaka 1 i 3, a mjerno mjesto 4, između točaka 3 i 5. Konačni rezultati mjerenja početnog presjeka tijela ispitnog uzorka dani su kasnije u analizi rezultata.

3.1.2. Mjerenje hrapavosti površine na mjernoj duljini uzorka

Kako je cilj rada odrediti utjecaj kvalitete površine ispitnih uzoraka na nesigurnost mjernih rezultata statičkog vlačnog ispitivanja, bilo je potrebno prije samog ispitivanja ispitati hrapavost površine na ispitnim uzorcima iz pojedine skupine. Slučajnim odabirom izabrana su po dva uzorka iz svake skupine na kojima će se ispitati hrapavost površine. Ispitivanje hrapavosti izvršeno je metodom dodira na elektroničko mehaničkom uređaju sa ticalom "Perthometer", oznake MU 2-127. Mjerenje parametara hrapavosti izvršeno je na tri jednako odmaknuta (svakih 30 mm) i rotirana (120°) mjesta (slika 18).



Slika 18. Skica mjernih mjesta za mjerenje hrapavosti

Za uzorke iz skupine A i B duljina opipavanja iznosi $l=5,6$ mm, a granična vrijednost GS električnog filtra iznosi $\lambda=0,8$ mm. Za uzorke iz skupine C duljina opipavanja iznosi $l=17,5$ mm, a graničnu vrijednost GS filtra $\lambda=2,5$ mm. Vertikalna povećanja VB za sve uzorke iznose $625,0 \mu\text{m}$. Kao rezultat mjerenja parametara hrapavosti date su srednje vrijednosti tri ponovljena mjerenja (tablica 2.)

Tablica 2. Rezultati mjerenja hrapavosti površine

Broj uzorka	R_{\max} [μm]	R_z [μm]	R_A [μm]
A4	6,2	5,4	0,9
A9	6,4	5,7	1,0
B3	7,6	7,1	1,2
B7	7,1	6,2	1,1
C1	28,7	26,3	4,5
C10	27,3	25,4	4,4

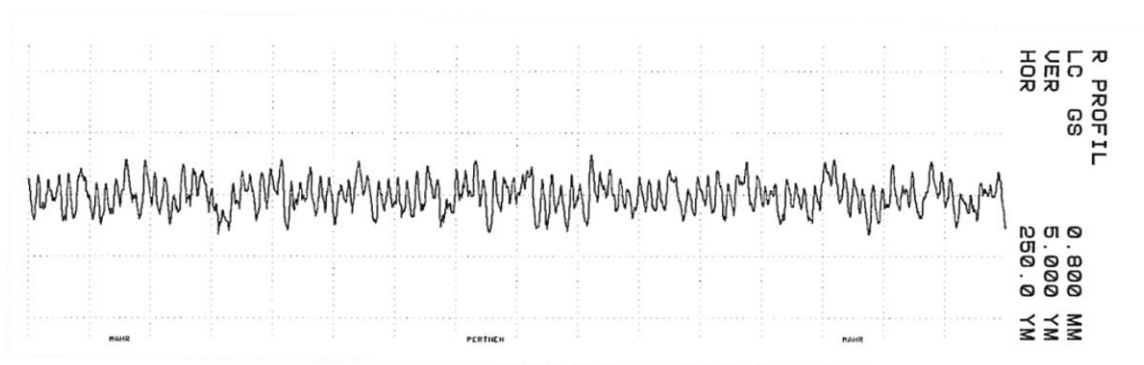
U tablici 2. R_{\max} najveća visina neravnina u μm, R_z prosječna visina neravnina u μm, R_A prosječno odstupanja profila u μm.

Iz tablice 2. se može zaključiti kako ispitni uzorci iz skupine A imaju najmanju hrapavost površine, a ispitni uzorci iz skupine C imaju najveću hrapavost površine. Na slijedećim slikama prikazani su rezultati ispitivanja parametara hrapavosti, za jedan uzorak iz svake skupine.

perthometer S8P 4.5


<div style="text-align: center;"><small>Mahr</small> Perthen</div>		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: A9 NR.: NAME: HABEK MESS.-NR.: 3 T8 FRW-750 750 26	
LT	5.600 MM				
LM	4.000 MM				
UB	625.0 YM				

KENNWERT				STATISTIK N = 3						
	LC	GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX		YM	6.4	0.2	0.4	6.6	6.2		
2	RZ		YM	5.7	0.4	0.8	6.0	5.2		
3	RA		YM	1.0	0.1	0.2	1.0	0.9		
4	RP		YM	3.0	0.3	0.6	3.3	2.7		
5	RPM		YM	2.7	0.3	0.6	2.9	2.4		
6	WT		YM	1.3	0.9	1.7	2.3	0.6		
7	RT		YM	6.5	0.2	0.3	6.7	6.3		
8	PT		YM	6.6	0.4	0.8	7.1	6.3		

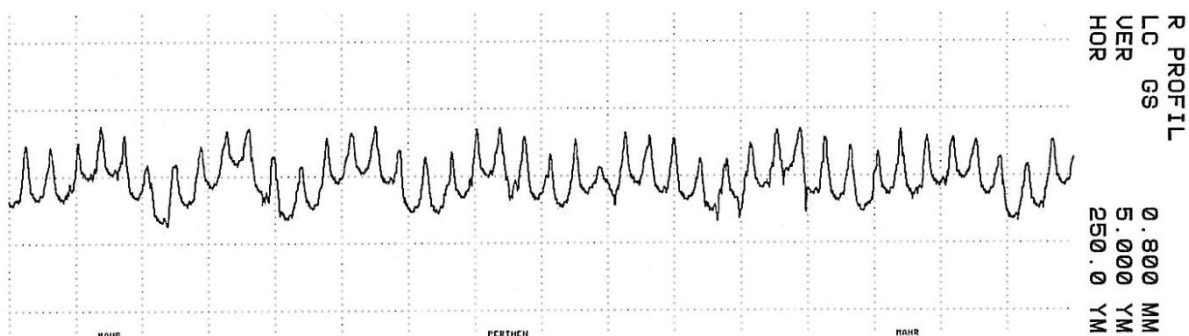


Slika 19. Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na uzorku A9

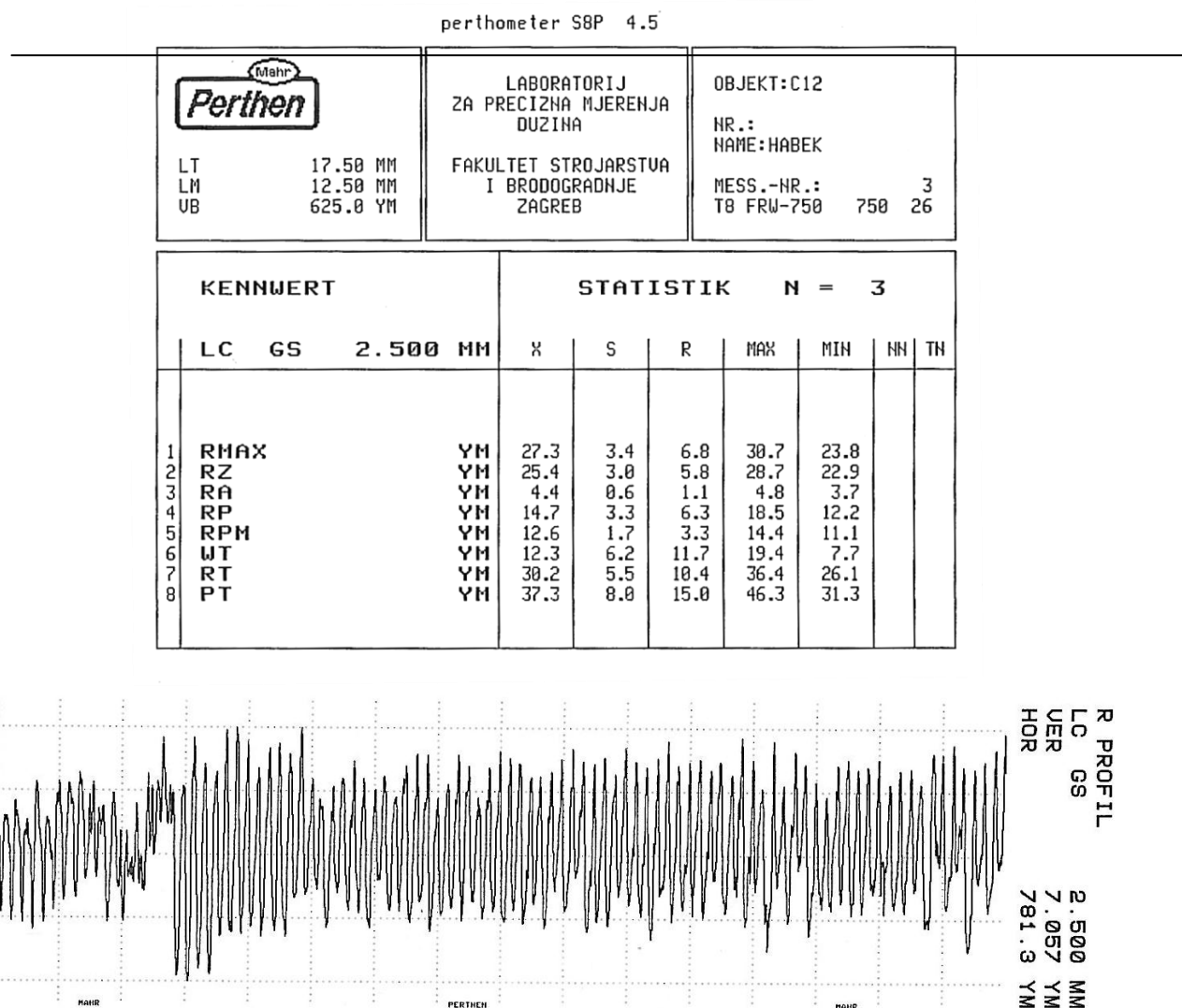
perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: B3 NR.: NAME: HABEK MESS.-NR.: 3 T8 FRW-750 750 26
LT	5.600 MM		
LM	4.000 MM		
UB	625.0 YM		

KENNWERT				STATISTIK N = 3						
	LC	GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										



Slika 20. Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na uzorku B3



Slika 21. Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na uzorku C12

3.2. Statičko vlačno ispitivanje

Prije samog ispitivanja, bilo je potrebno napraviti nekoliko probnih ispitivanja, koja su poslužila za utvrđivanje ponašanja materijala prilikom vlačnog ispitivanja i određivanje parametara ispitivanja. Pomoću probnih ispitivanja određene su brzine ispitivanja. Probna ispitivanja izvršena su na 6 ispitnih uzoraka iz supine C koji su bili predviđeni za to. Ispitivanje je vršeno na računalno upravljanom ispitnom uređaju "WPM Leipzig, EU 40. mod", klase točnosti 0,5 sukladno normi HRN EN ISO 7500-1. Ispitni uređaj je pogonjen hidraulički.



Slika 22. Slika ispitnog uređaja EU 40 mod

Brzine ispitivanja postavljene su na slijedeći način. Do opterećenja od 10 kN, brzina pomaka za sve ispitne uzorke je iznosila 3 mm/min. Nakon 10 kN, brzina pomaka za ispitne uzorke označene oznakama od 1 do 5 iz svih skupina, iznosila je 2 mm/min. A za ispitne uzorke označene oznakama od 6 do 10 iz svih skupina, iznosila je 10 mm/min. Nakon opterećenja od 130 kN, brzina pomaka je porasla na 20 mm/min i tako je zadržana do kraja ispitivanja, odnosno do loma ispitnog uzorka. Sila predopterećenja iznosila je 0,5 kN. Produljenje do granice razvlačenja je mjereno ekstenzimetrom MF, MFA2, 012872. Nakon granice razvlačenja, produljenje nije bilo moguće mjeriti ekstenzimetrom, jer njegovo najveće mjerno područje iznosi 2mm. Dalje je mjereno senzorom koji mjeri pomake traverze kidalice. Temperatura prilikom ispitivanja iznosila je $24 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

3.3. Rezultati ispitivanja

Uređaj za vlačno ispitivanje je uz dijagram sila-produljenje određivao i slijedeće parametre: modul elastičnosti E , gornju granicu razvlačenja R_{eH} , donju granicu razvlačenja R_{eL} , vlačnu čvrstoću R_m . Istezanje nakon loma A i suženje Z određeno je ručno, mjerenjem konačne mjerne duljine nakon loma L_u i konačnog promjera poprečnog presjeka nakon loma d_u , te izračunavanjem prema pripadajućim jednadžbama 2-15 i 2-16.

3.3.1. Ispitivanje pri brzini pomaka od 2 mm/min

Parametri određeni pri ovoj brzini su gornja granica razvlačenja R_{eH} i donja granica razvlačenja R_{eL} . Vlačna čvrstoća R_m određena je pri brzini pomaka od 20 mm/min. Rezultati ispitivanja dani su u tablicama od 3. do 5.

Tablica 3. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine A pri 2mm/min

Ispitni uzorak	d_u [mm]	S_u [mm ²]	Z [%]	L_u [mm]	A [%]
1	11,87	110,6602	64,76	129,79	29,79
2	11,86	110,4738	64,82	130,92	30,92
3	11,8	109,3588	65,18	130,17	30,17
4	11,8	109,3588	65,17	130,84	30,84
5	11,7	107,5132	65,77	130,68	30,68
Ispitni uzorak	R_{eH} (N/mm ²)	R_{eL} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)	F_m (kN)
1	374,1614	357,9327	470,2115	320,4959	147,638
2	370,7626	347,1032	473,2044	318,5226	148,592
3	375,0258	352,1594	476,2389	317,8577	149,573
4	375,8126	358,4923	477,0587	320,2495	149,784
5	375,2316	357,9602	476,6158	317,8585	149,721
Sr. vrij.	374,1988	354,7295	474,6659	318,9968	149,062
Std. dev.	2,01	4,99	2,915	1,288	0,931

Tablica 4. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine B pri 2mm/min

Ispitni uzorak	d_u [mm]	S_u [mm ²]	Z [%]	L_u [mm]	A [%]
1	11,87	110,6602	64,77	129,22	29,22
2	11,7	107,5132	65,76	129,6	29,6
3	11,76	108,6187	65,40	130,13	30,13
4	11,82	109,7299	65,03	130,01	30,01
5	11,79	109,1736	65,23	130,19	30,19
Ispitni uzorak	R_{eH} (N/mm ²)	R_{eL} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)	F_m (kN)
1	361,786	345,7653	468,9798	314,3321	147,304
2	358,9246	337,4327	465,8264	313,2688	146,260
3	374,8045	358,7522	476,3485	317,0624	149,532
4	363,5066	345,5032	470,7939	318,3499	147,723
5	374,1996	357,9677	476,8943	320,5924	149,721
Sr. vrij.	366,6442	3490842	471,7686	316,7211	148,108
Std. dev.	7,360	9,110	4,777	2,974	1,486

Tablica 5. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine C pri 2mm/min

Ispitni uzorak	d_u [mm]	S_u [mm ²]	Z [%]	L_u [mm]	A [%]
1	11,7	107,5132	65,856	127,48	27,48
2	11,74	108,2495	65,871	127,78	27,78
3	11,66	106,7793	65,873	129,16	29,16
4	11,64	106,4133	66,007	129,59	29,59
5	11,75	108,434	65,502	129,6	29,6
Ispitni uzorak	R_{eH} (N/mm ²)	R_{eL} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)	F_m (kN)
1	374,6439	357,4535	475,5789	317,5438	149,753
2	379,3161	365,1727	476,5894	315,5666	151,164
3	379,1503	360,8752	475,4001	315,3247	148,745
4	357,3358	342,0314	468,5905	311,9337	146,691
5	362,1542	341,7068	469,6372	318,0525	147,616
Sr. vrij.	370,5201	353,4479	473,1592	315,6843	148,793
Std. dev.	10,157	10,918	3,739	2,412	1,757

3.3.2. Ispitivanje pri brzini pomaka od 10 mm/min

Parametri određeni pri ovoj brzini su gornja granica razvlačenja R_{eH} , donja granica razvlačenja R_{eL} . Vlačna čvrstoća R_m određena je pri brzini pomaka od 20 mm/min, isto kao i kod prethodno navedenih ispitivanja. Rezultati ispitivanja dani su u tablicama od 6. do 8.

Tablica 6. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine A pri 10mm/min

Ispitni uzorak	d_u [mm]	S_u [mm ²]	Z [%]	L_u [mm]	A [%]
6	11,61	105,8655	66,29	130,64	30,64
7	11,66	106,7793	65,98	129,58	29,58
8	11,78	108,9884	65,29	130,26	30,26
9	11,79	109,1736	65,24	130,01	30,01
10	11,59	105,501	66,40	129,94	29,94
Ispitni uzorak	R_{eH} (N/mm ²)	R_{eL} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)	F_m (kN)
6	381,8528	360,9338	476,6355	316,4068	149,676
7	383,2597	362,2027	476,1965	321,1788	149,481
8	372,0396	349,7364	470,7324	317,0002	147,798
9	383,2234	358,3441	476,356	321,4852	149,596
10	383,3109	362,9597	475,857	315,8409	149,413
Sr. vrij.	380,7373	358,8353	475,1555	318,3824	149,193
Std. dev.	4,9	5,38	2,488	2,726	0,786

Tablica 7. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine B pri 10mm/min

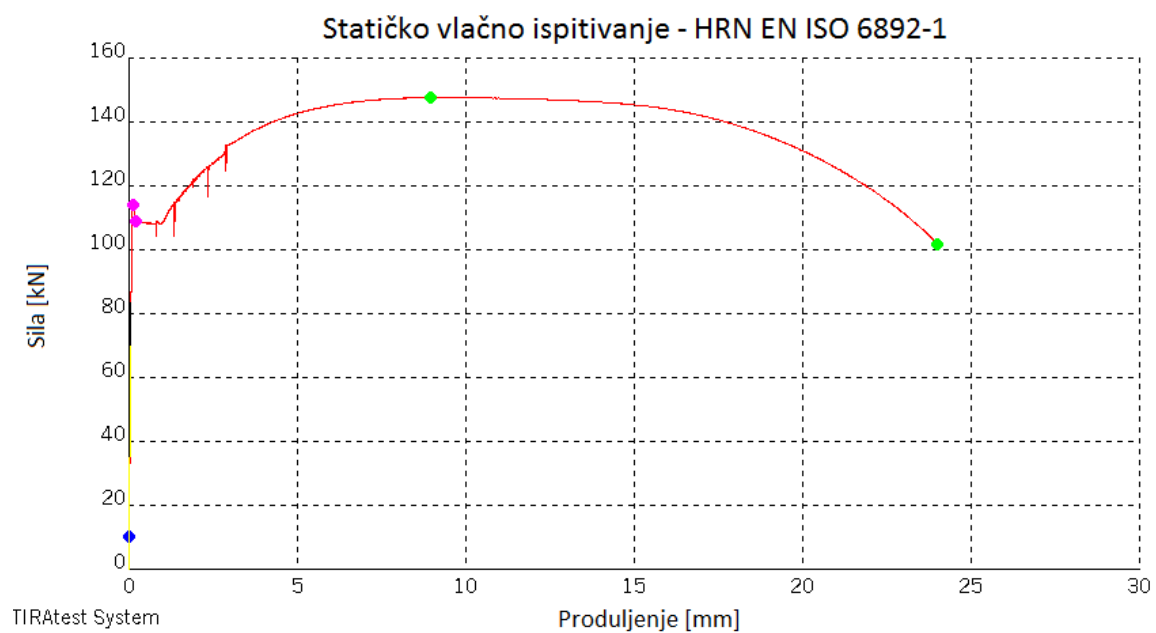
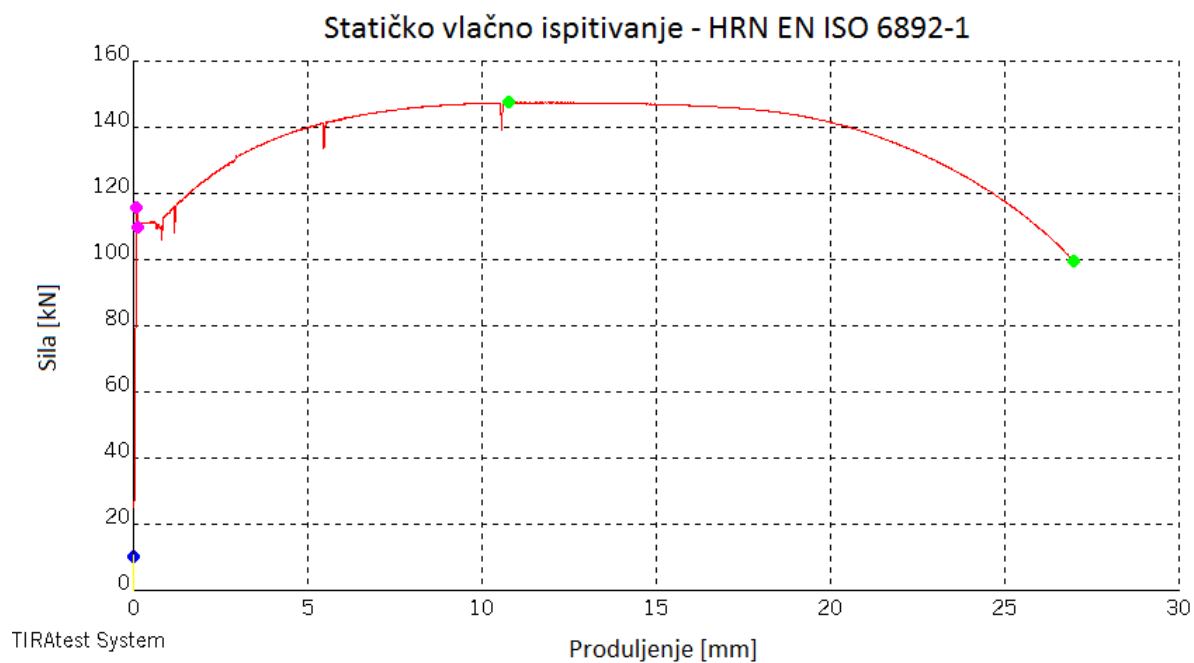
Ispitni uzorak	d_u [mm]	S_u [mm ²]	Z [%]	L_u [mm]	A [%]
6	11,64	106,4133	66,10	130,28	30,28
7	11,59	105,501	66,41	130,44	30,44
8	11,85	110,2876	64,80	129,31	29,31
9	11,67	106,9625	65,90	130,05	30,05
10	11,62	106,0479	66,22	130,14	30,14
Ispitni uzorak	R_{eH} (N/mm ²)	R_{eL} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)	F_m (kN)
6	373,4354	351,7742	471,1058	316,0948	147,862
7	369,2316	346,8071	469,5149	312,7128	147,470
8	381,7854	361,3402	475,4594	323,2056	148,961
9	369,2737	349,7345	470,4162	317,1979	147,577
10	384,0046	365,2318	476,3818	317,0867	149,561

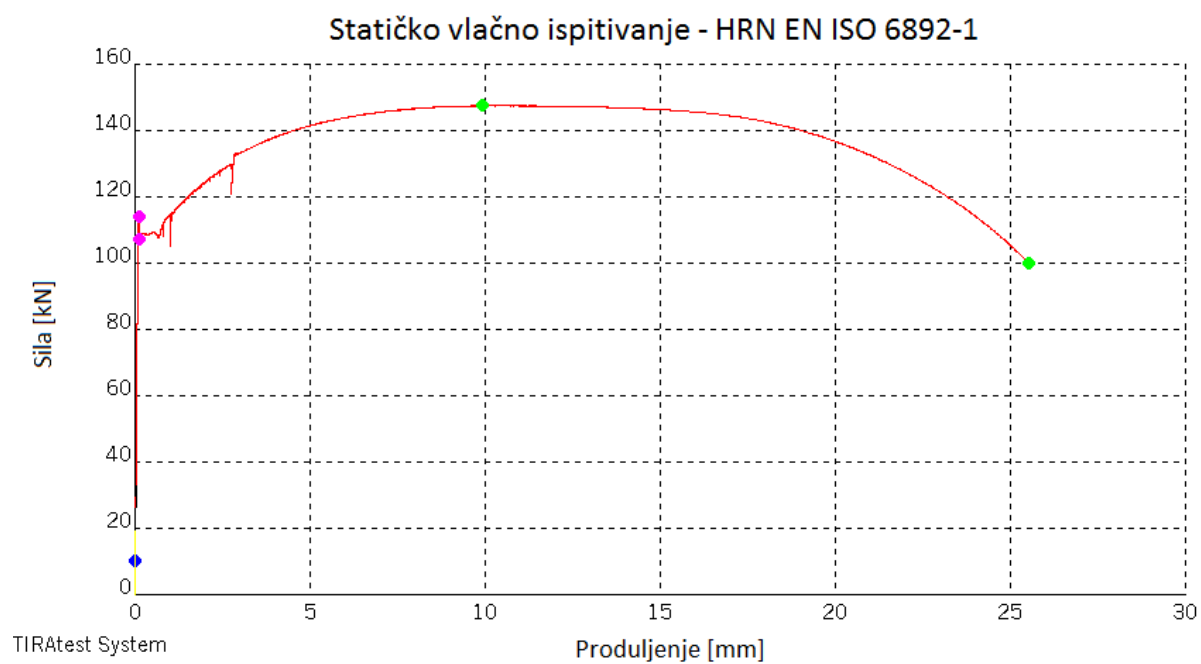
Sr. vrij.	375,5461	354,9776	472,5756	317,2595	148,286
Std. dev.	6,967	7,908	3,122	3,789	0,925

Tablica 8. Rezultati mjerenja na ispitnim uzorcima iz skupine C pri 10mm/min

Ispitni uzorak	d_u [mm]	S_u [mm²]	Z [%]	L_u [mm]	A [%]
6	11,64	106,4133	66,10	130,28	30,28
7	11,59	105,501	66,41	130,44	30,44
8	11,85	110,2876	64,80	129,31	29,31
9	11,67	106,9625	65,90	130,05	30,05
10	11,62	106,0479	66,22	130,14	30,14
Ispitni uzorak	R_{eH} (N/mm²)	R_{eL} (N/mm²)	R_m (N/mm²)	R_k (N/mm²)	F_m (kN)
6	373,4354	351,7742	471,1058	316,0948	147,862
7	369,2316	346,8071	469,5149	312,7128	147,470
8	381,7854	361,3402	475,4594	323,2056	148,961
9	369,2737	349,7345	470,4162	317,1979	147,577
10	384,0046	365,2318	476,3818	317,0867	149,561
Sr. vrij.	375,5461	354,9776	472,5756	317,2595	148,286
Std. dev.	6,967	7,908	3,122	3,789	0,925

Nakon ispitivanja dobiveni su dijagrami sila-produljenje za svaki pojedini uzorak. Na slikama od 23. do 25. prikazani su dijagrami sila-produljenje za jedan uzorak iz svake skupine, i to za različite brzine ispitivanja.

**Slika 23. Dijagram sila-produljenje za uzorak A1****Slika 24. Dijagram sila-produljenje za uzorak B9**



Slika 25. Dijagram sila-produljenje za uzorak C5

4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

4.1. Analiza mjesta loma ispitnih uzoraka

Analizom mjesta loma na ispitnim uzorcima može se zaključiti kako su ispitni uzorci iz skupina A i B pucali približno na sredini mjerne duljine (slika 28. i 29.), a ispitni uzorci iz skupine C su pucali bliže krajevima ispitne duljine (slika 29), otprilike na jednoj trećini ispitne duljine od glave uzorka.



Slika 26. Ispitni uzorci iz skupine A nakon ispitivanja



Slika 27. Ispitni uzorci iz skupine B nakon ispitivanja



Slika 28. Ispitni uzorci iz skupine C nakon ispitivanja

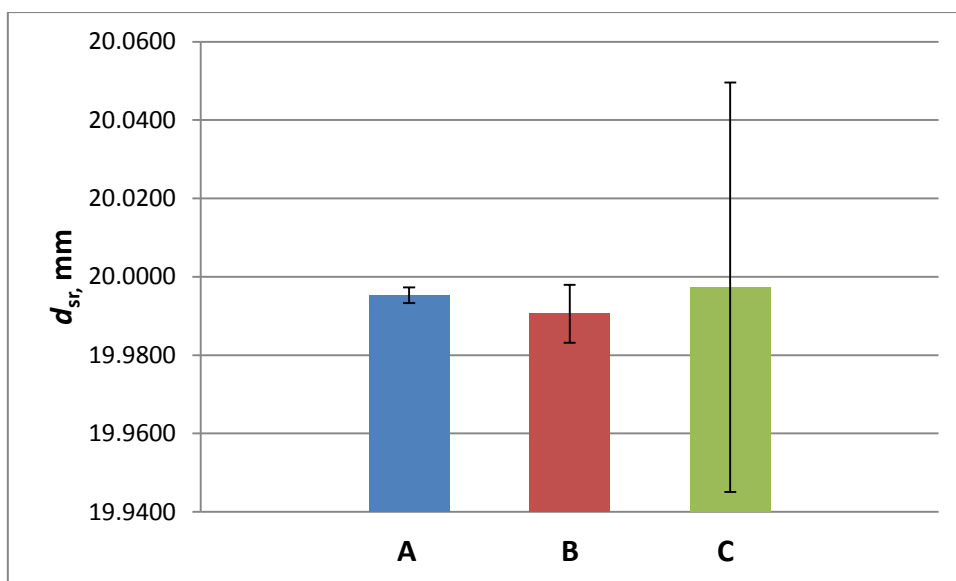
4.2. Analiza vrijednosti početnog promjera tijela ispitnih uzoraka

Mjerenjem početnog promjera poprečnog presjeka utvrđeno je da se promjer d_0 , kod uzoraka iz skupine C, znatno mijenja u odnosu na uzorke iz skupine A ili B. Kod nekih uzoraka iz skupine C, d_0 je varirao i preko 100 μm između prvog i petog mjernog mjesta na ispitnoj duljini. U tablici 9. prikazane su izmjerene srednj vrijednosti promjera tijela ispitnih uzoraka, njihove standardne devijacije, najveća i najmanja izmjerena vrijednost i razlika između najveće i najmanje vrijednosti.

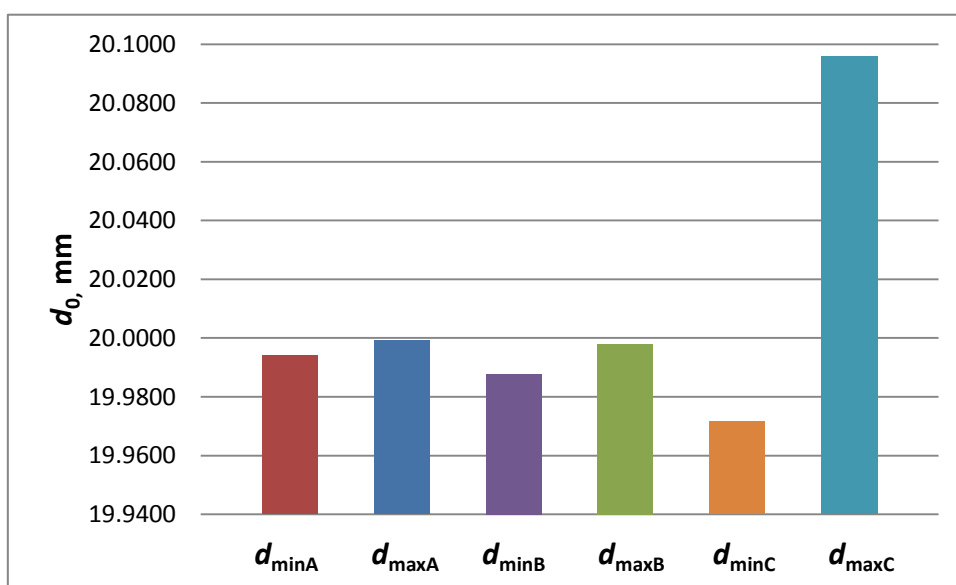
Tablica 9. Rezultati mjerenja d_0

	Skupina A	Skupina B	Skupina C
d_{sr} [mm]	19,9953	19,9906	19,9974
S. dev.	0,0020	0,0074	0,0522
d_{max} [mm]	19,9992	19,9979	20,0959
d_{min} [mm]	19,9941	19,9877	19,9717
Δd [mm]	0,0051	0,0102	0,1242

Iz tablice je vidljivo kako je odstupanje uzoraka iz skupine C preko 10 puta veće nego odstupanje uzoraka iz skupine B, a čak 20 puta veće nego odstupanje uzoraka iz skupine A. Prema normi HRN EN ISO 6892-1, razlika između najveće i najmanje početne mjere ne smije premašiti vrijednost od 0,05 mm [4]. Ovaj uvjet zadovoljavaju uzorci iz skupina A i B, ali ne i uzorci iz skupine C. Slika 29. prikazuje srednje vrijednosti promjera ispitnih uzoraka po pojedinim skupinama i njihove standardne devijacije, pomoći kojih se jasno vidi koliko je odstupanje ispitnih uzoraka iz skupine C veće od ostalih skupina.



Slika 29. Dijagramski prikaz rezultata mjerenja d_o



Slika 30. Dijagramski prikaz najveće i najmanje vrijednosti d_o

Na dijagramu sa slike 30. jasno se vidi kako je razlika između najmanje i najveće vrijednosti najveća kod uzoraka iz skupine C. Ispitni uzorci obrađeni na CNC obradnom centru zadovoljavaju zahtjeve norme o dopuštenim odstupanjima poprečnog presjeka, dok uzorci obrađeni na univerzalnoj tokarilici ne zadovoljavaju.

4.3. Analiza rezultata statičkog vlačnog ispitivanja

4.3.1. Procjena i proračun mjerne nesigurnosti mjerenja

Kako bi se utvrdio utjecaj kvalitete površine na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja, neophodno je odrediti mjernu nesigurnost rezultata ispitivanja. Određena je nesigurnost slijedećih parametara: nesigurnost početne površine poprečnog presjeka S_0 , nesigurnost gornje i donje granice razvlačenja, R_{eH} i R_{eL} , vlačne čvrstoće R_m , nesigurnost površine poprečnog presjeka nakon loma S_u , nesigurnost istezanja nakon loma A i suženja Z . Sve nesigurnosti su računate prema formulama u točki 2.7. U tablicama od 10. do 12. prikazane su proširene nesigurnosti naprezanja R_{eH} , R_{eL} i R_m . Uzorci s oznakama od 1 do 5 iz svake skupine, su ispitivani brzinom pomaka od 2 mm/min. Uzorci s oznakama od 6 do 10 iz svake skupine, ispitivani su pri brzini pomaka od 10 mm/min. Nakon određivanja gornje i donje granice razvlačenja, brzina razmicanja je porasla na 20 mm/min za sve uzorke.

Tablica 10. Rezultati mjerenja čvrstoća skupine A

Uzorak	Brzina pomaka 2 mm/min			Uzorak	Brzina pomaka 10 mm/min		
	R_{eH} [N/mm ²]	R_{eL} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]		R_{eH} [N/mm ²]	R_{eL} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]
1	374,1614	357,9327	470,2115	6	381,8528	360,9338	476,6355
2	370,7626	347,1032	473,2044	7	383,2597	362,2027	476,1965
3	375,0258	352,1594	476,2389	8	372,0396	349,7364	470,7324
4	375,8126	358,4923	477,0587	9	383,2234	358,3441	476,356
5	375,2316	357,9602	476,6158	10	383,3109	362,9597	475,857
Sr. vrij.	374,2	354,7	474,7	Sr. vrij.	380,7	358,8	475,1
$U(x)$	±2,3	±2,2	±2,9	$U(x)$	±2,4	±2,3	±3

Tablica 11. Rezultati mjerenja čvrstoća skupine B

Uzorak	Brzina pomaka 2 mm/min			Uzorak	Brzina pomaka 10 mm/min		
	R_{eH} [N/mm ²]	R_{eL} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]		R_{eH} [N/mm ²]	R_{eL} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]
1	361,786	345,7653	468,9798	6	373,4354	351,7742	471,1058
2	358,9246	337,4327	465,8264	7	369,2316	346,8071	469,5149
3	374,8045	358,7522	476,3485	8	381,7854	361,3402	475,4594
4	363,5066	345,5032	470,7939	9	369,2737	349,7345	470,4162
5	374,1996	357,9677	476,8943	10	384,0046	365,2318	476,3818
Sr. vrij.	366,6	349,1	471,8	Sr. vrij.	375,5	354	472,6
$U(x)$	±2,2	±2,1	±2,8	$U(x)$	±2,3	±2,1	±2,8

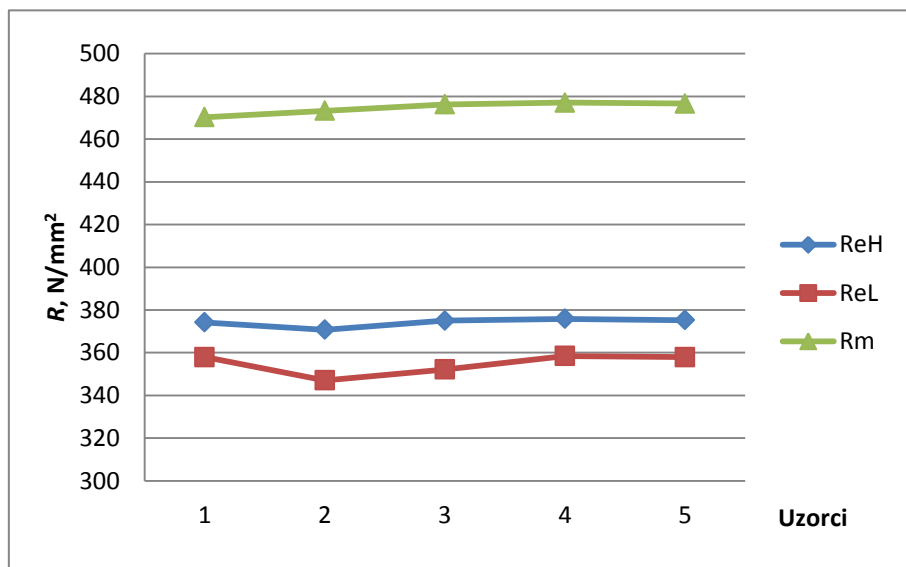
Tablica 12. Rezultati mjerenja čvrstoća skupine C

Uzorak	Brzina pomaka 2 mm/min			Uzorak	Brzina pomaka 10 mm/min		
	R_{eH} [N/mm ²]	R_{eL} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]		R_{eH} [N/mm ²]	R_{eL} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]
1	374,6439	357,4535	475,5789	6	371,3622	352,9337	470,3385
2	379,3161	365,1727	476,5894	7	387,0702	365,7160	476,5090
3	379,1503	360,8752	475,4001	8	381,3158	358,5152	475,6237
4	357,3358	342,0314	468,5905	9	381,7823	363,3086	475,3452
5	362,1542	341,7068	469,6372	10	368,6502	352,2156	467,7987
Sr. vrij.	370,5	353,4	473,2	Sr. vrij.	378,0	358,5	473,1
$U(x)$	±5,1	±4,9	±6,5	$U(x)$	±6,8	±6,5	±8,5

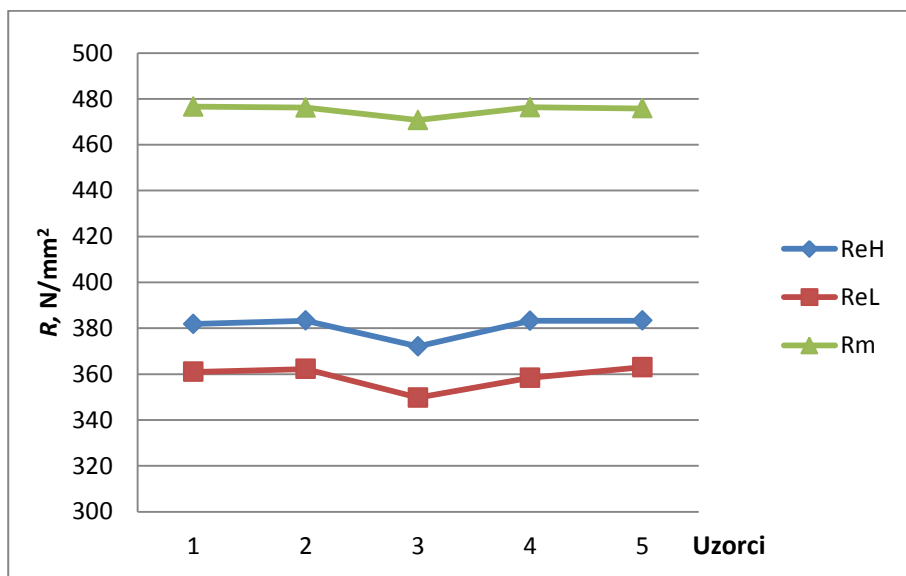
Proširena mjerna nesigurnost je računana uz faktor pokrivanja $k=2$ i razinu povjerenja od 95%.

4.3.2. Analiza rezultata mjerenja čvrstoća

U slijedećim slikama, dijagramskim prikazom, prikazani su rezultati mjerenja čvrstoća. Na slikama 31. i 32. prikazani su rezultati mjerenja čvrstoća skupine A.

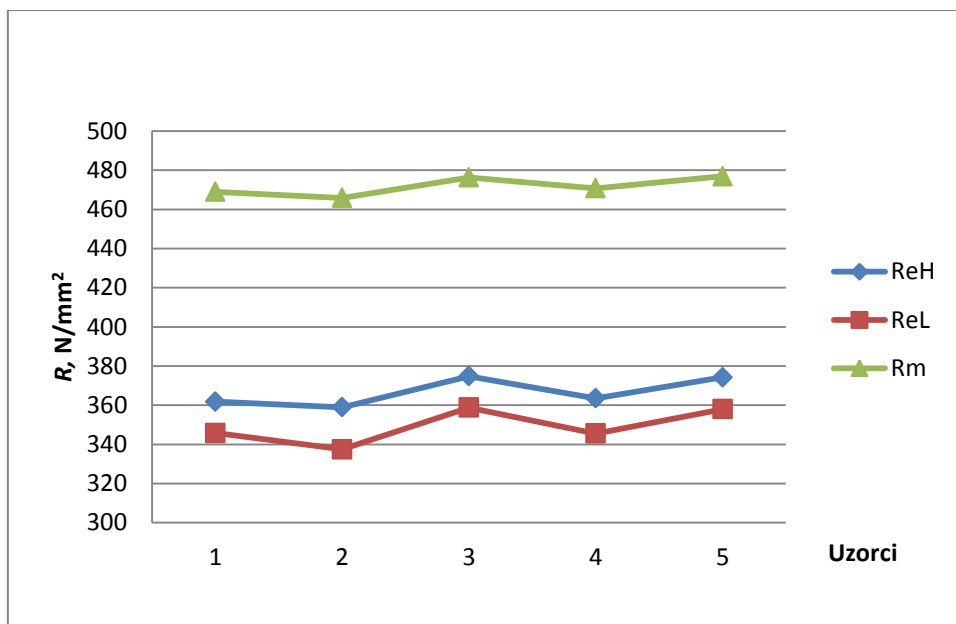


Slika 31. Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 2 mm/min (skupina A)

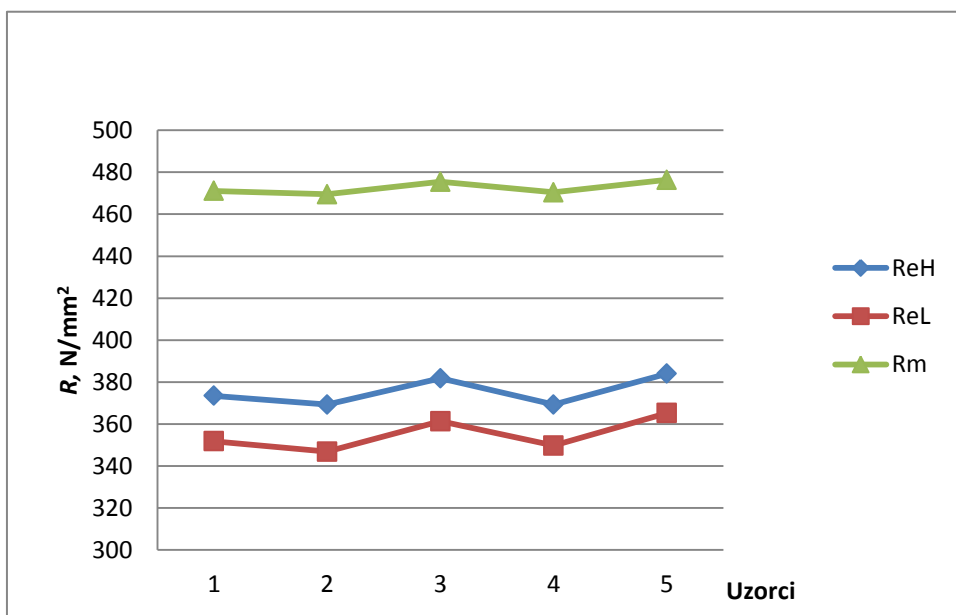


Slika 32. Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 10 mm/min (skupina A)

Na slikama 33. i 34. prikazani su rezultati mjerenja čvrstoća skupine B.

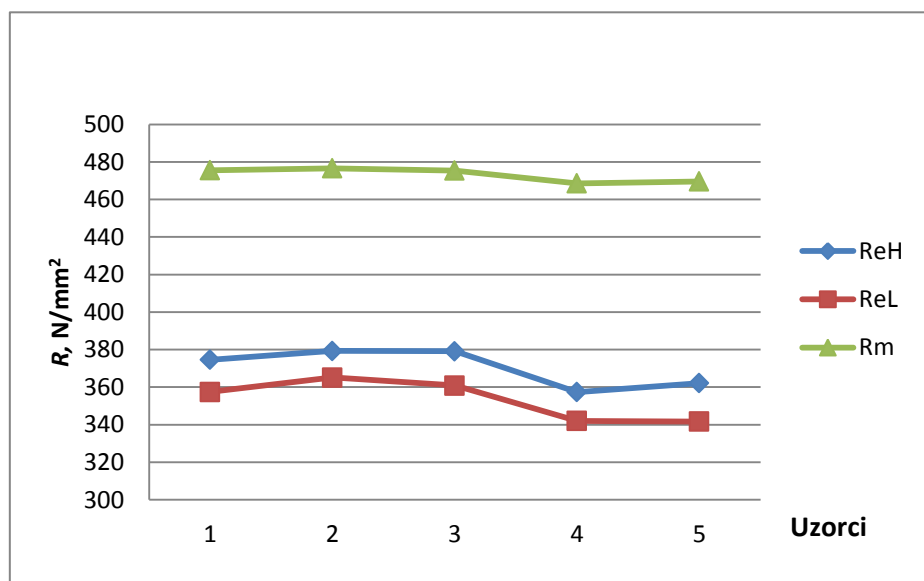


Slika 33. Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 2 mm/min (skupina B)

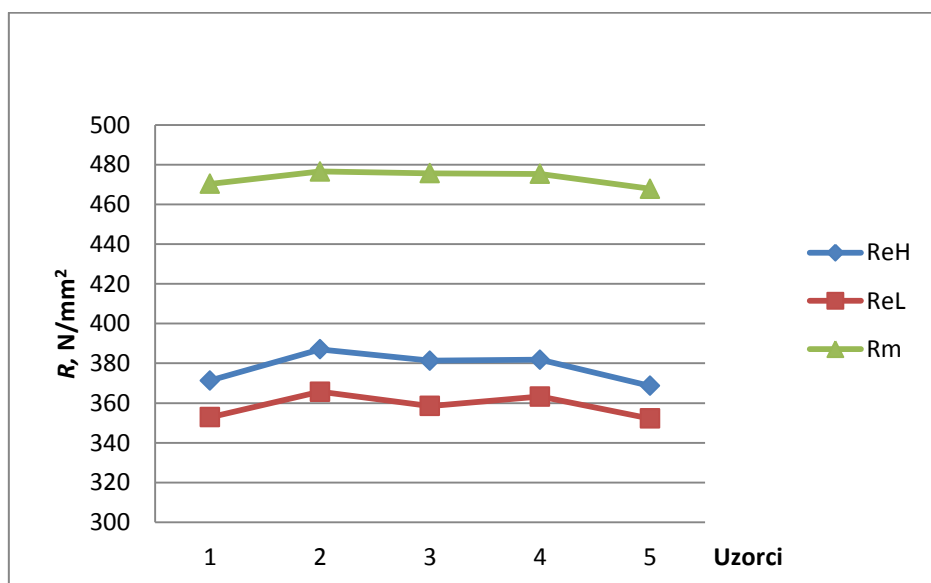


Slika 34. Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 10 mm/min (skupina B)

Na slikama 35. i 36. prikazani su rezultati mjerenja čvrstoća skupine C.



Slika 35. Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 2 mm/min (skupina C)

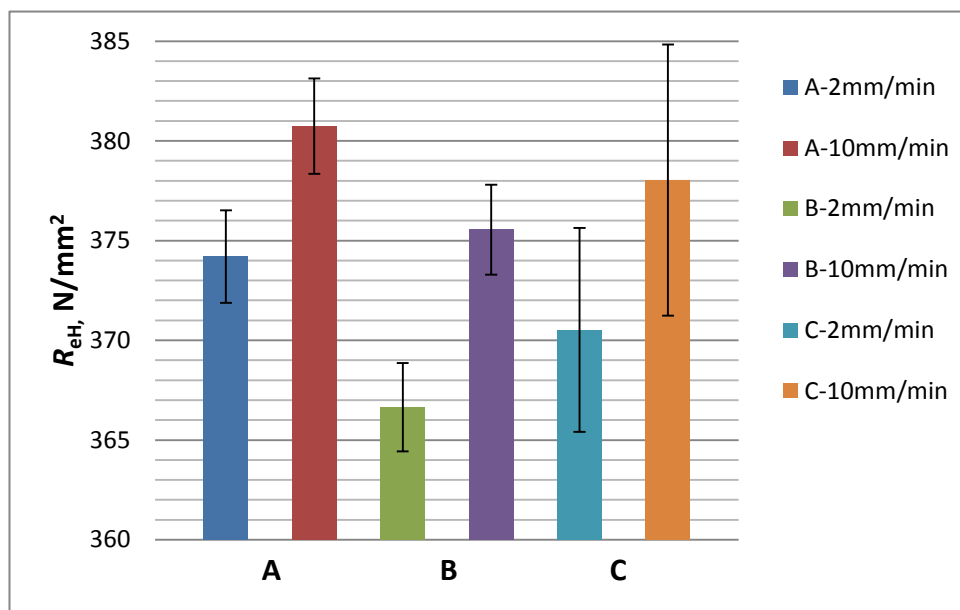


Slika 36. Dijagramski prikaz čvrstoća pri brzini od 10 mm/min (skupina C)

Kod većih brzina ispitivanja, veće je odstupanje izmjerenih vrijednosti što se vidi iz vrijednosti standardnih devijacija u tablicama od 3. do 8.

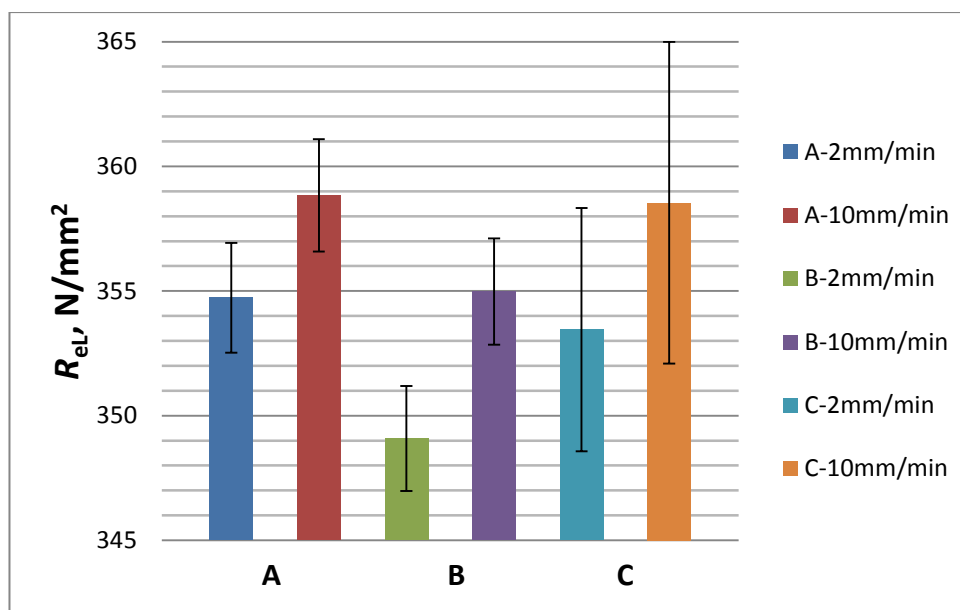
Iz tablica od 10. do 12. je jasno vidljivo da uzorci iz skupine C imaju i do tri puta veću nesigurnost od uzoraka iz skupina A i B. No kako bi te razlike bile uočljivije, na sljedećim slikama (slike 37. do 39.), prikazani su dijagrami za svaku granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Na dijagramima su prikazane srednje vrijednosti naprežanja za svaku skupinu

uzoraka, ovisno o brzini ispitivanja. Također su prikazane trake pogreške, koje prikazuju proširenu mjernu nesigurnost za svaku skupinu ispitnih uzoraka.



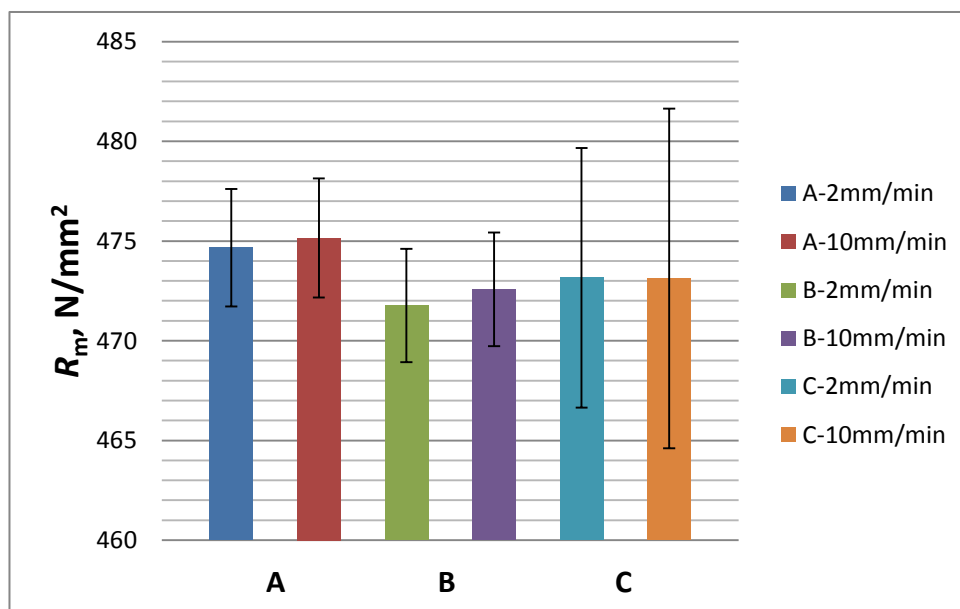
Slika 37. Dijagram prikazuje gornje granice razvlačenja R_{eH}

Na slici 37. se jasno vidi kako ispitni uzorci iz skupine C imaju veću nesigurnost od uzoraka iz skupine A i B. Uočljivo je kako se mjerna nesigurnost ne mijenja povećanjem brzine ispitivanja. No iznos gornje granice razvlačenja raste porastom brzine ispitivanja, što je vidljivo iz dijagrama. Tako uzorci iz iste skupine, npr. skupine A, imaju za otprilike 7 N/mm² višu gornju granicu razvlačenja s povećanom brzinom. Pojava da rastom brzine istezanja rastu i čvrstoće je već poznata.



Slika 38. Dijagramski prikaz rezultata donje granice razvlačenja R_{eL}

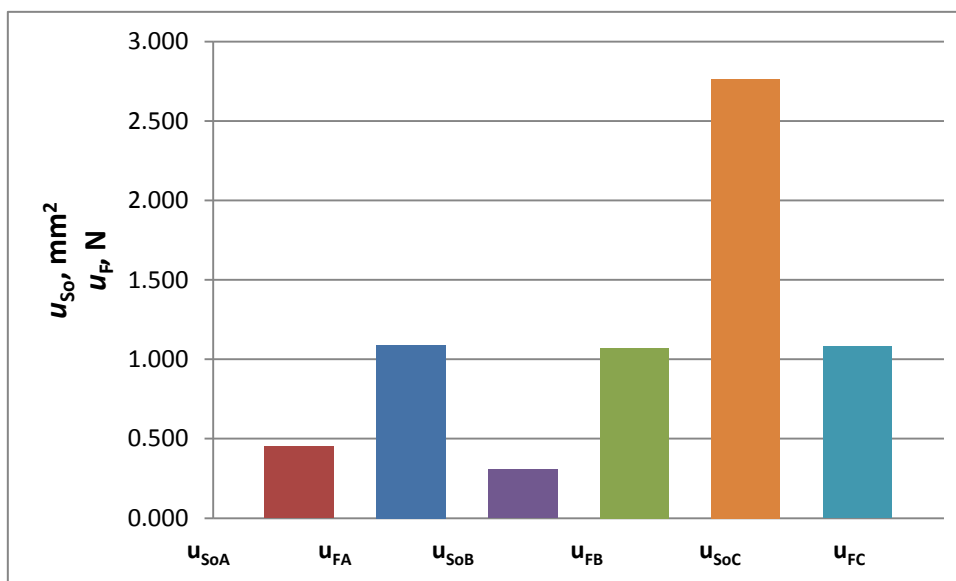
Na slici 38. također se dokazuje utjecaj brzine ispitivanja na iznos granice razvlačenja, i to slučaju donje granice razvlačenja. Što je brzina veća, veća je i donja granica razvlačenja. No brzina nema nikakav ili gotovo nikakav utjecaj na mjernu nesigurnost. I u ovom slučaju mjerna nesigurnost je dva do tri puta veća kod uzoraka iz skupine C od nesigurnosti uzoraka iz skupina A i B.



Slika 39. Dijagramski prikaz rezultata vlačne čvrstoće R_m

Brzina pomaka je kod određivanja R_m iznosila 20 mm/min i to kod svih uzoraka iz svih skupina. Iz dijagrama se vidi kako nema značajne razlike u vlačnim čvrstoćama ni između skupina ni između uzoraka iz iste skupine. No, mjerna nesigurnost je ponovno za 2 do 3 puta veća kod uzoraka iz skupine C. Iz tog se može zaključiti kako na mjernu nesigurnost naprezanja utječe kvaliteta obrade uzoraka.

Na slici 40. prikazani su doprinosi sile i početne površine poprečnog presjeka na nesigurnost čvrstoća, kao dokaz da sila ima konstantni doprinos na nesigurnost kod svih skupina, a poprečni presjek ima znatno veći doprinos kod skupine C.



Slika 40. Doprinos nesigurnosti sile i početne površine na nesigurnost naprezanja

4.3.3. Analiza nesigurnosti istezanja i suženja

U sljedećim tablicama (tablice 14. do 16.) prikazani su rezultati konačnog istezanja i njegove proširene nesigurnosti i rezultati suženja i njegove proširene nesigurnosti.

Tablica 13. Rezultati mjerenja istezanja skupine A

Uzorak	Brzina pomaka 2 mm/min		Uzorak	Brzina pomaka 10 mm/min	
	A [%]	Z [%]		A [%]	Z [%]
1	29,79	64,76	1	30,64	66,28
2	30,92	64,82	2	29,58	65,98
3	30,17	65,18	3	30,26	65,28
4	30,84	65,16	4	30,01	65,23
5	30,68	65,77	5	29,94	66,4
Sr. vrij.	30,48	65,14	Sr. vrij.	30,07	65,84
Proš. mj. nesigurnost	±1,195	±0,57	<i>U(x)</i>	±1,19	±0,56

Tablica 14. Rezultati mjerenja istezanja skupine B

Uzorak	Brzina pomaka 2 mm/min		Uzorak	Brzina pomaka 10 mm/min	
	A [%]	Z [%]		A [%]	Z [%]
1	29,22	64,76	1	30,28	66,09
2	29,6	65,75	2	30,44	66,41
3	30,13	65,39	3	29,31	64,79
4	30,01	65,02	4	30,05	65,90
5	30,19	65,22	5	30,14	66,22
Sr. vrij.	29,83	65,24	Sr. vrij.	30,04	65,89
Proš. mj. nesigurnost	±1,19	±0,56	<i>U(x)</i>	±1,19	±0,55

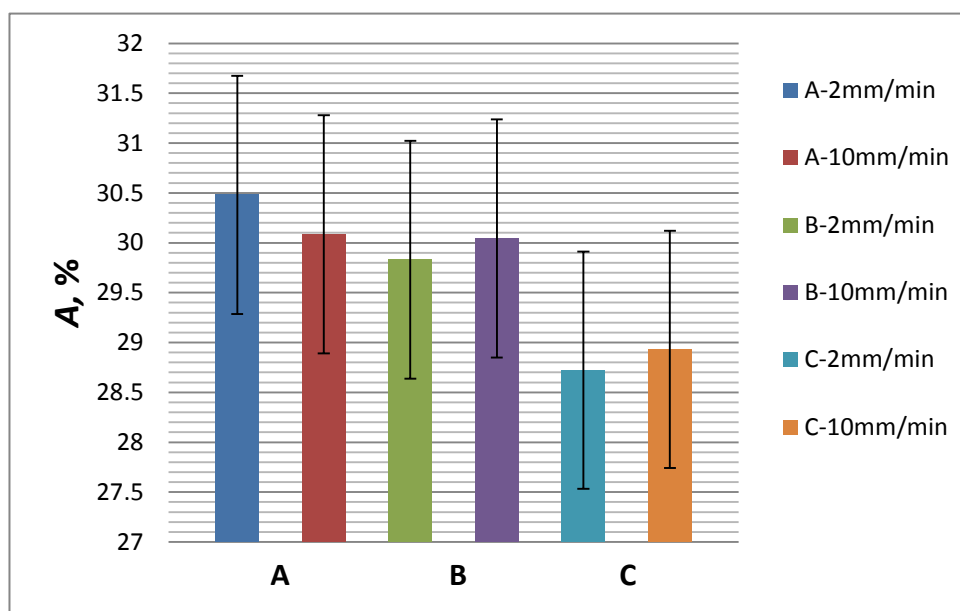
Tablica 15. Rezultati mjerenja istezanja skupine C

Uzorak	Brzina pomaka 2 mm/min		Uzorak	Brzina pomaka 10 mm/min	
	A [%]	Z [%]		A [%]	Z [%]
1	27,48	65,85	1	28,17	66,21
2	27,78	65,87	2	28,24	66,14
3	29,16	65,87	3	28,91	65,62
4	29,59	66,00	4	29,61	65,69
5	29,6	65,50	5	29,72	65,65
Sr. vrij.	28,72	65,82	Sr. vrij.	28,93	65,87
Proš. mj. nesigurnost	$\pm 1,189$	$\pm 0,670$	$U(x)$	$\pm 1,19$	$\pm 0,80$

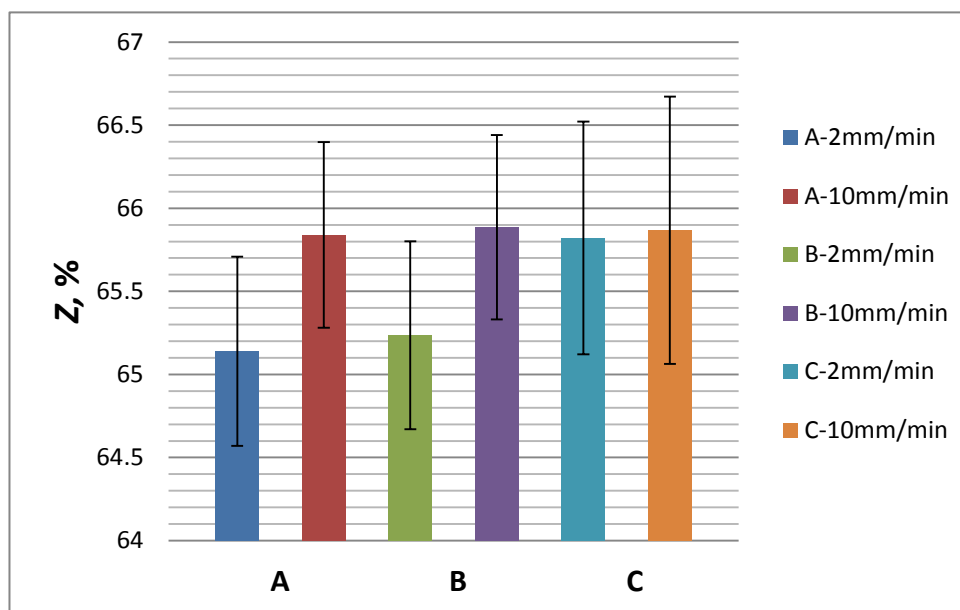
Proširena mjerna nesigurnost je računana uz faktor pokrivanja $k=2$ i razinu povjerenja 95%.

Na slijedećim slikama (slike 34. i 35.) prikazani su dijagrami, koji prikazuju srednju vrijednost konačnog istezanja i suženja za svaku skupinu uzoraka i svaku brzinu ispitivanja.

Trake pogrešaka prikazuju mjernu nesigurnost konačnog istezanja i suženja.

**Slika 41. Dijagramski prikaz mjerenja istezanja A**

Iz dijagrama na slici 34. jasno se vidi kako su mjerne nesigurnosti približno iste za sve skupine ispitnih uzoraka i sve brzine ispitivanja. Iznos konačnog istezanja u skupini C je oko 1% manji nego u skupinama A i B. Iz tog se može zaključiti kako hrapavost površine ne utječe na mjernu nesigurnost konačnog istezanja, ali ima utjecaj na iznos istezanja. O utjecaju brzine se ne može diskutirati jer se plastična deformacija, o kojoj ovisi konačno istezanje, odvijala pri istoj brzini za sve uzorke (20mm/min).



Slika 42. Dijagramski prikaz rezultata mjerenja suženja Z

Iz dijagrama na slici 35. je vidljivo kako su mjerne nesigurnosti suženja gotovo jednake za skupine A i B, bez obzira na brzinu. Nesigurnost za skupinu C je malo veća u odnosu na ostale skupine, što može biti posljedica veće hrapavosti površine ispitnih uzoraka, ali ta razlika nije značajna. Prema dijagramu, brzine ispitivanja imaju utjecaj na iznos suženja, ali taj utjecaj se javlja samo kod uzoraka iz skupina A i B. Kod skupine C razlike u iznosu suženja, ovisno o brzini ispitivanja, su vrlo male ili gotovo nikakve.

5. ZAKLJUČAK

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđeno je da kvaliteta obrade ispitnih uzoraka ima dosta značajan utjecaj na mjernu nesigurnost rezultata ispitivanja. Međutim kvaliteta obrade nije na sve mjerne rezultate utjecala u istoj mjeri. Na temelju provedenih ispitivanja mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- kvaliteta izrade ispitnih uzoraka ima utjecaj na vrijednosti gornje granice razvlačenja (R_{eH}), donje granice razvlačenja (R_{eL}) i na vlačnu čvrstoću (R_m). Ove vrijednosti direktno ovise o mjerenju početne površine tijela ispitnog uzorka. Što su veća odstupanja od oblika i veća hrapavost, to su veće i mjerne nesigurnosti mjerenja početne površine, a time i vrijednost čvrstoće.
- brzine pomaka pri statičkom vlačnom ispitivanju imaju utjecaj na gornju i donju granicu razvlačenja, a nemaju izražen utjecaj na vlačnu čvrstoću (R_m), istezljivost (A) i suženje (Z). Iz tog razloga su u novoj normi HRN EN ISO 6892-1 i pooštreni zahtjevi na brzinu ispitivanja.
- mjerna nesigurnost primijenjene sile ima znatno manji doprinos u ukupnoj mjernoj nesigurnosti pojedinog naprezanja, ako su ispitni uzorci izrađeni sukladno normi HRN EN ISO 6892-1. Što znači da treba posvetiti veću pažnju izradi ispitnih uzoraka.
- veličine istezljivost (A) i suženje (Z) isključivo ovise o točnosti mjerenja početne i konačne mjerne duljine ispitnog uzorka, te konačne mjere poprečnog presjeka tijela ispitnog uzorka na mjestu loma.
- same vrijednosti pojedinog mehaničkog svojstva, bez izražene mjerne nesigurnosti, ne daje pravi uvid u ponašanje materijala. Vrijednost mjerne nesigurnosti ne pokazuje samo kolika su odstupanja, već i da li je sve u procesu statičkog vlačnog ispitivanja provedeno u skladu s zahtjevima norme. Povećana mjerna nesigurnost ukazuje na pogreške u mjerenju.

PRILOZI

I. CD-R disk

LITERATURA

- [1] Donald R. Askeland; Pradeep P. Fulay; Wendellin J. Wright: Science and engineering of materials, Sixth edition, Cengage Learning 2010.
- [2] J. R. Davis: Tensile testing, Second edition, ASM international 2004.
- [3] W. Gabauer: Code of Practice No. 7, The Determination of Uncertainties in Tensile Testing, Voest-Alpine Stahl Linz GmbH 2000.
- [4] International standard ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, 2009.
- [5] Thomas M. Adams: Guide for Estimation of Measurement Uncertainty In Testing, 2002.
- [6] Marc A. Meyers; Krishan K. Chawla: Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press, 2009.
- [7] Goran Rožing: Materijali u elektrotehnici, auditorne vježbe.
- [8] S. Tarafder; K. K. Gupta: Estimation of Uncertainty in mechanical Testing, 2004.